

# 临南洼陷沙三段异常地层压力及其演化特征

李纯泉<sup>1</sup>, 刘惠民<sup>2</sup>

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营 257015

**摘要:** 异常地层压力的演化历史对深入理解油气的生、运、聚动力学过程至关重要。为揭示临南洼陷内异常地层压力的演化特征, 在流体包裹体组合概念的限定下, 利用热力学模拟的方法, 对沙三段进行了地层古压力重建。地层压力系数随时间的演化表明, 沙三中、下亚段在30 Ma左右即发育有异常高压, 而现今洼陷内局部发育的异常低压为异常高压经过一定时期的演化后在晚期形成, 自30 Ma以来的整个演化过程表现出降压—增压—降压的旋回性特征。沙三上亚段在该地质历史时期均未发育异常高压, 但晚期也表现出明显的降压特征。结合生烃史、充注史及断裂活动性综合分析表明, 临南洼陷沙三段异常高压主要起源并受控于油气的生成与充注, 而异常低压主要起源并受控于断裂的多次、长期活动。

**关键词:** 异常地层压力; 流体包裹体; 热力学模拟; 临南洼陷; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2013)01-0105-07

收稿日期: 2012-01-10

## Abnormal Formation Pressure and Its Evolution Features of the Third Member, Shahejie Formation, Linnan Sag

LI Chun-quan<sup>1</sup>, LIU Hui-min<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences, Ministry of Education, Wuhan 430074, China

2. Geological Research Institute of Shengli Oilfield Branch Co. Sinopec., Dongying 257015, China

**Abstract:** Evolution history of abnormal formation pressure is vital to further understanding of the dynamic processes of hydrocarbon generation, migration and accumulation. In order to reveal the evolution features of the abnormal formation pressure in Linnan Sag, thermodynamic modeling in accordance with concepts of fluid inclusion assemblage was employed to reconstruct the palaeopressures of the third member, Shahejie Formation. The evolution of formation pressure coefficients with time suggest that there had already developed overpressures at about 30 Ma in the middle and the lower sections of the third member of Shahejie Formation, and the whole evolution since 30 Ma shows a cyclic feature of pressure decreasing, increasing and decreasing. Underpressure was the result of overpressure evolution to the later period of that time. There was no overpressure developed in the upper section of the third member of Shahejie Formation during that time, but there was an obvious pressure decreasing trend during the later period of the whole evolution. Considering the hydrocarbon generation and charge histories, and the fault activities, integrated analysis indicate that overpressure was mainly caused and controlled by hydrocarbon generating and charging in the earlier time, while underpressure was mainly caused and controlled by multiple times and long-term activities of the faults, especially in the later time.

**Key words:** abnormal formation pressure; fluid inclusion; thermodynamic modeling; Linnan sag; petroleum geology.

勘探实践表明, 在异常地层压力(异常高压或异常低压)发育的含油气盆地内, 油气藏的分布与异常压力的分布关系密切(Hunt, 1990; Law and Spen-

cer, 1998; 肖焕钦等, 2003; 金博等, 2004)。对地层压力的研究, 包括现今压力和古压力(地质历史时期的流体压力)两个方面。现今压力可以通过各种测试方

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40702022); 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. CUGL090211); “构造与油气资源”教育部重点实验室开放课题项目(No. TPR-2011-19)。

作者简介: 李纯泉(1974—), 男, 副教授, 主要从事油气地质方面的教学和科研工作。E-mail: tiger\_lcq@163.com

法,如钻杆测试(DST)、重复地层测试(RFT)等,可以直接获取来加以刻画;而无论现今压力的表现如何(常压、异常高压或异常低压),都是从一定的古压力发展演化而来。因此,对发育异常地层压力的含油气盆地地层古压力的重建,以及对异常地层压力演化特征的刻画,更有助于深入理解油气的整个生、运、聚动力学过程及成藏机理(解习农和刘晓峰,2000;郝芳和董伟良,2001;郝芳等,2002),对油气勘探与开发具有更为重要的实践指导意义。本文将利用流体包裹体技术,开展临南洼陷沙三段的地层古压力重建,再现其异常压力的演化历史,并探讨其主控因素。

## 1 地质背景

临南洼陷位于渤海湾盆地惠民凹陷西南部,是惠民凹陷中最为重要的次一级洼陷,其构造轴向呈NNE向,形态和规模受北部的临商断裂带和南部的夏口断层控制,面积近 $1\ 300\ km^2$ (图1)。在洼陷的

形成过程中,沉积了完整的第三系地层,由下到上划分为孔店组、沙河街组(可细分为四段)、东营组、馆陶组和明化镇组,并形成了多套生、储和盖组合(图1)。其中,沙河街组三段(沙三段)地层既是临南洼陷最为重要的烃源岩发育时段,又是重要的储集岩及盖岩发育时段,其内形成的各类油气藏,尤其是岩性油气藏,为该区增储上产的重要勘探目标。而对洼陷内局部地区沙三段地层中钻遇的明显异常高压和异常低压的成因及演化特征不明,阻碍了对整个洼陷内油气成藏规律认识的进一步深入。

## 2 现今实测地层压力特征

来自180口井的281个实测地层压力数据表明,临南洼陷沙三段发育明显的异常低压和异常高压,压力梯度主体范围为 $0.6\sim1.4\ MPa/100\ m$ (图2)。异常低压自埋深1700 m左右开始发育,压力系数主体介于 $0.6\sim0.9$ 之间,个别低至0.42(夏40井2927.30 m);异常高压发育于埋深3200 m

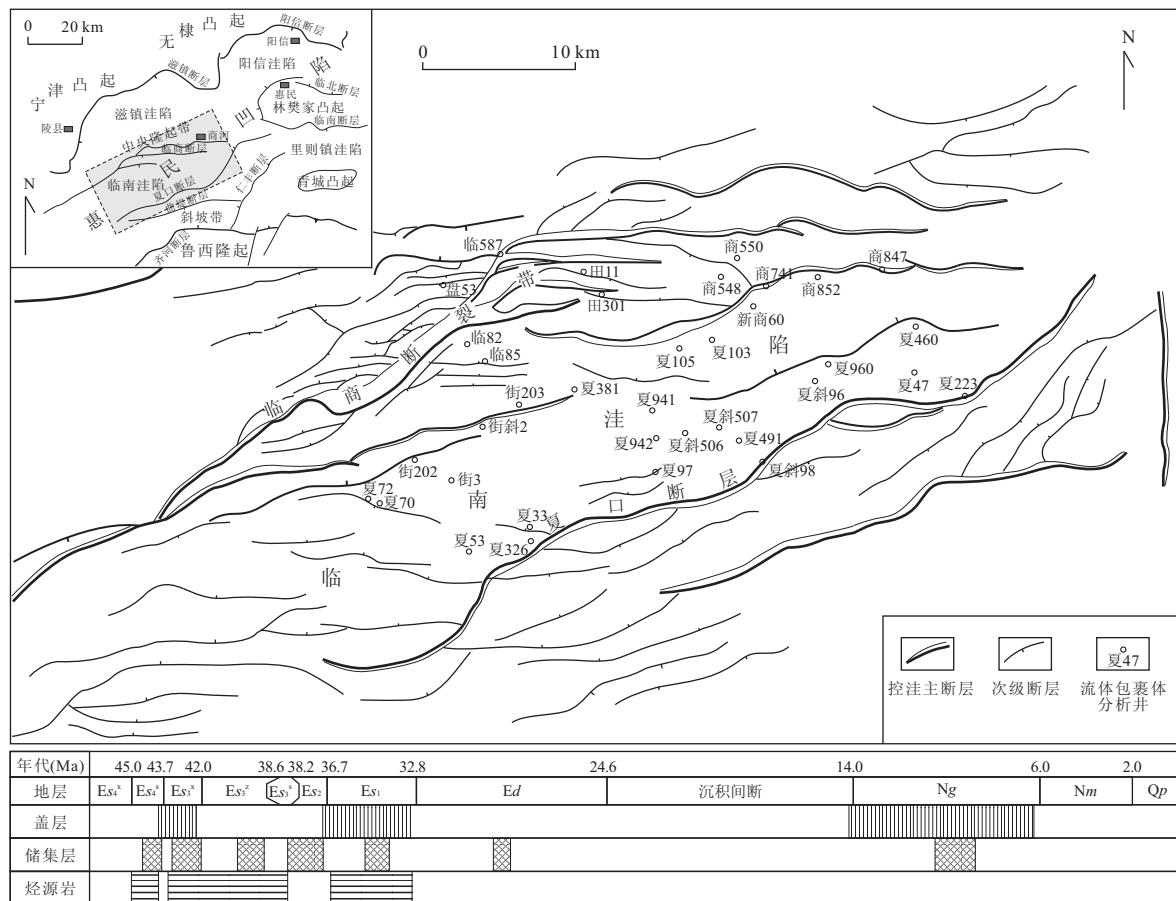


图1 临南洼陷构造位置及生储盖组合

Fig. 1 Structural location and assemblages of source rocks, reservoir rocks, and cap rocks of Linnan sag

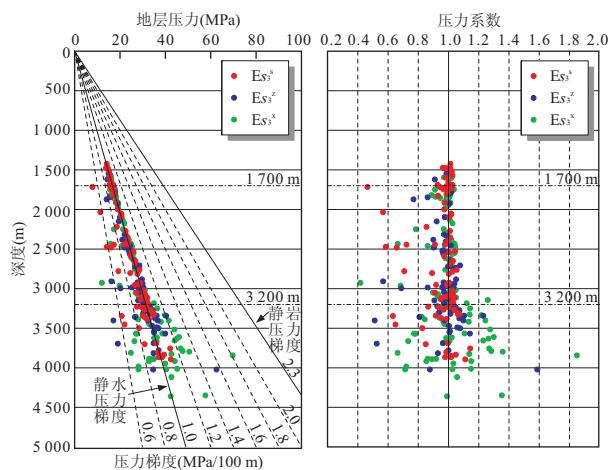


图 2 临南洼陷沙三段现今实测地层压力及压力系数与深度关系

Fig. 2 Relations of currently tested formation pressures and pressure coefficients to the depth in the third member, Shahejie formation, Linnan sag

以下,压力系数主体介于 1.2~1.4 之间,个别高达 1.85(夏 941 井,3 843.79 m)。根据临南洼陷沙三段实测压力值在纵向上的分布特征,可整体上将其划分为上部常压系统(埋深小于 1 700 m),中部异常低压—常压共存系统(埋深 1 700~3 200 m 之间),以

及下部异常低压—常压—异常高压共存系统(埋深大于 3 200 m)。在沙三段的上( $Es_3^s$ )、中( $Es_3^z$ )、下( $Es_3^x$ )3 个亚段中,沙三下亚段的异常高压及异常低压均明显发育,可识别出上部、中部和下部 3 个压力系统;沙三中亚段的异常高压和异常低压发育情况次之,但也可识别出上部、中部和下部 3 个压力系统;而沙三上亚段仅发育常压和异常低压,仅发育上部和中部压力系统。此外,各亚段中压力系统的具体深度范围与整体相比有细微波动。

### 3 地层古压力及其演化

#### 3.1 古压力重建

重建地层古压力的方法很多,通常采用盆地模拟的方法加以实现,但受各种先验性参数的约束;流体包裹体作为古流体的原始样品,保存了地质历史时期的温压条件等丰富信息,因而被用来恢复古压力(Munz, 2001; 陈红汉等,2002; 李善鹏等,2003)。本文将采用流体包裹体热力学模拟的方法(Thiéry *et al.*, 2000; 米敬奎等,2003; Thiéry, 2006; 王金志等,2008),也即通过检测含烃类包裹体(如油包裹体)及其同期的盐水包裹体,利用 VTFLINC 软件,重建

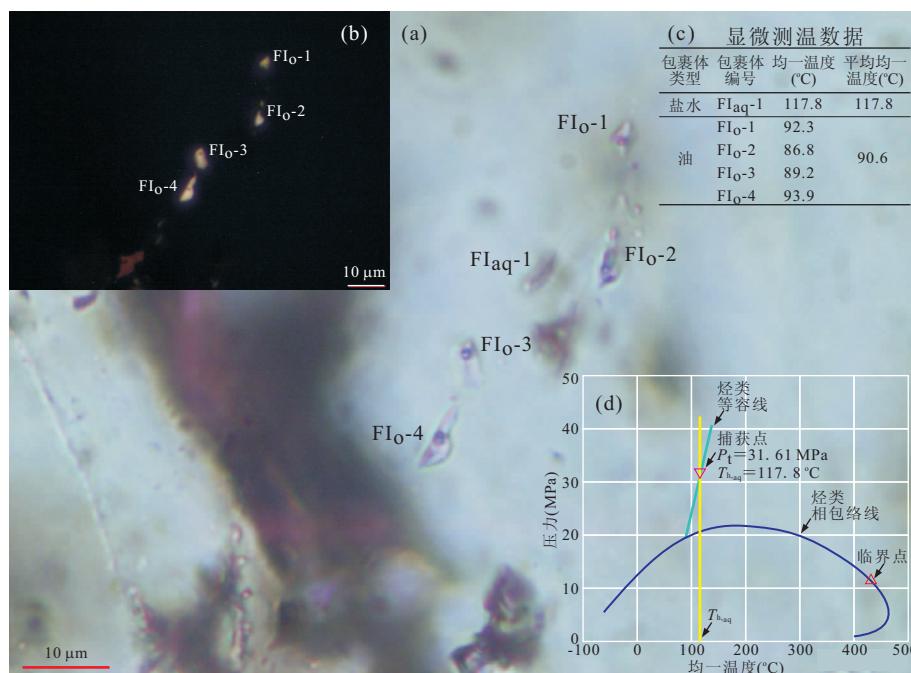


图 3 街 202 井沙三中亚段一流体包裹体组合显微测温及古流体压力热力学模拟结果

Fig. 3 Results of microthermometry and thermodynamic modeling of palaeo pressure with a fluid inclusion assemblage in  $Es_3^z$  formation of well Jie202

a. 透射光下一个流体包裹体组合的显微照片;b. 紫外光下 a 中流体包裹体组合的显微(荧光)照片;c. a 中流体包裹体组合的各包裹体显微测温数据;d. a 中流体包裹体组合的热力学模拟结果

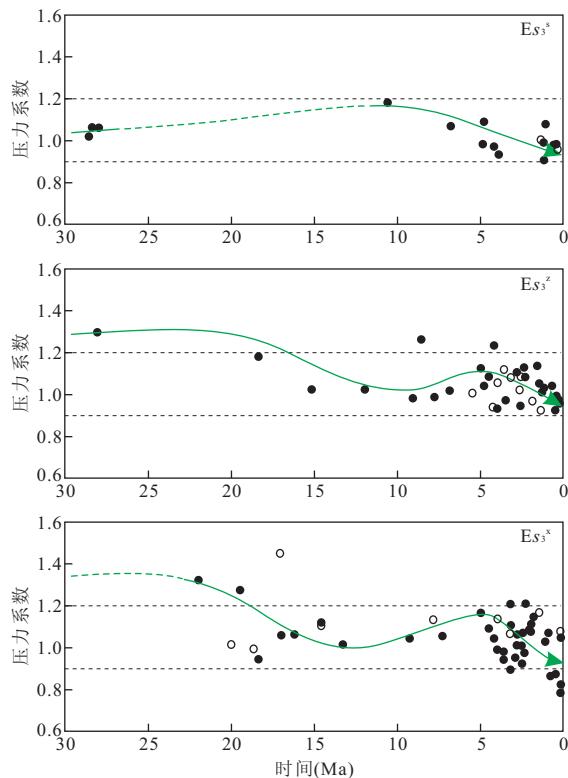


图4 临南洼陷沙三段各亚段地层压力系数随时间演化

Fig. 4 Evolution of pressure coefficients with time in each section of the third member, Shahejie formation, Linnan sag  
空心点为油包裹体数据,实心点为含烃盐水包裹体数据

被包裹烃类的相包络线及等容线,利用同期盐水包裹体的均一温度( $T_{h, ag}$ )与其等容线的交点,获取捕获时的压力条件 $P_t$ (图3d).该方法对每一烃类包裹体进行模拟,势必造成较大的数据量和工作量,而且相近似烃类包裹体可能会由于不同的结果而造成对规律反映的不清楚.为此,特限定对每一个流体包裹体组合(池国祥和卢焕章,2008)开展热力学模拟,既减少工作量和数据量,又在可靠的基础上提高了对规律的反映效果(图3).

本次对采自36口井的73块沙三段流体包裹体样品进行检测,在流体包裹体组合概念的限定下,通过对每一流体包裹体组合的油包裹体(或含烃盐水包裹体)及其同期盐水包裹体的热力学模拟,获得了不同地质历史时期的107个流体包裹体组合的古压力热力学模拟数据.通过包裹体均一温度数据与精细埋藏史图相结合,可获得包裹体捕获时的古埋深,从而可换算出各古压力所对应的压力系数.因此,可以将压力系数随时间演化的形式更为直观地显示出异常高压或异常低压及其演化特征(图4).

### 3.2 古压力演化特征

正如Law and Spencer(1998)所述,在现今表现为低压,而又为热成熟的岩层,很可能是由原始的异常高压系统演化而来.本次流体包裹体热力学模拟的结果表明,临南洼陷沙三段中发育的异常低压正是如此.从图4可以看出,临南洼陷沙三中、下亚段中流体包裹体记录的早期(30 Ma左右)地层古压力均为异常高压,现今的异常低压由其经历一定时期的演化后在晚期形成.整体来讲,作为主要烃源岩的沙三中、下亚段的古压力演化均表现出降压—增压—降压的总体演化趋势,而沙三上亚段在整个地质历史时期未经历异常高压的发育阶段,但在晚期亦表现出明显的降压趋势.

## 4 异常地层压力成因及主控因素分析

含油气盆地中异常地层压力的成因机理一直以来都是压力研究的一项重要内容.异常高压的成因机制研究已经得到足够重视,Osborne and Swarbrick(1997)重新系统评述了异常高压的成因机理.相对而言,异常低压的成因机制研究较为薄弱,但也有不少国内外学者进行了积极的探索(Swarbrick and Osborne, 1998; 解习农等, 2003; 张立宽等, 2004; 高岗等, 2008).为探寻临南洼陷沙三段异常压

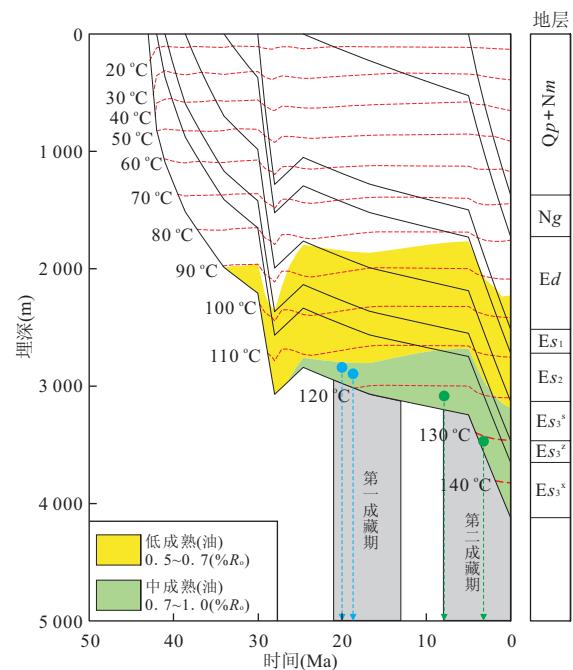


图5 临南洼陷夏941井生烃史及充注史

Fig. 5 Hydrocarbon generation and charge history of well Xia941 in Linnan sag

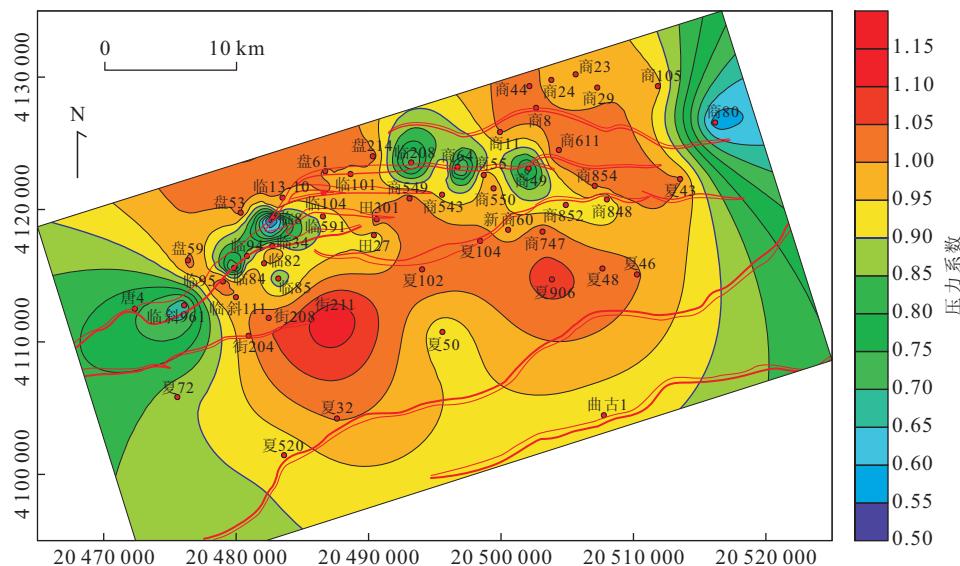


图 6 临南洼陷沙三上亚段实测地层压力系数与断裂分布关系

Fig. 6 Relation of the tested formation pressure coefficients to the fault distribution in the upper section of the third member, Shahejie formation, Linnan sag

力成因及主控因素,将本次流体包裹体热力学模拟获得的古压力结果,与油气的生、运、聚过程(陈庆春等,2001;赵阳等,2004;张金亮和杨子成,2008)以及断裂活动性研究(赵密福等,2000;王书宝等,2007;陈伟等,2010)的成果相结合,通过综合性分析可以发现,临南洼陷沙三段异常地层压力在其成因演化及主控因素方面存在以下两个明显的特征。

#### 4.1 异常高压起源并受控于油气活动

本次研究表明,临南洼陷沙三段地层的异常高压起源并受控于洼陷内的油气活动,主要是指油气的生成及充注。从时间上讲,临南洼陷沙三段在35 Ma左右进入生烃门限开始生烃(图5),而本次模拟在储层中检测到的最早异常高压发生在30 Ma左右,显示了生烃增压从源岩到储层的压力传递连贯性,且两者具有较好的匹配关系;再者,在一些井中检测到的油气充注正好与异常高压的发育相耦合,油气的充注对异常高压的形成具有一定贡献,特别是第二成藏期的早期(8~5 Ma),油气充注的增压作用明显(图4和图5)。从空间上讲,临南洼陷沙三段异常高压发育的层段基本上都与油页岩或油泥岩发育层段相伴生,如夏942井,沙三段在3 600 m以下发育异常高压,而油泥岩或油页岩仅在3 600~3 700 m井段就占64.8 m,烃类的生成造成压力的急剧增大,产生异常高压。

#### 4.2 异常低压起源并受控于断裂活动

针对临南洼陷所发育的异常低压,不同的学者

根据自身的研究成果提出了相应的一些解释,如戴立昌等(2003)提出了“上覆负荷差异支撑”的解释模型。本次通过古压力恢复,将其与断裂活动开展时间耦合研究后发现,临南洼陷沙三段的异常低压主要是由于断裂多次活动、长期泄压所致,特别是晚期断裂的活动,造成了现今洼陷内的异常低压分布格局。临南洼陷断裂的活动性主要表现为多期、幕式以及分段的特点(赵密福等,2000;王书宝等,2007;陈伟等,2010)。东营期和明化镇期是断层活动的两个重要时期,特别是东营末期(24~14 Ma)和明化镇末期(5~2 Ma),断层活动强烈,封闭性差,对地层流体充分发挥“泵吸”作用,造成压力释放(图4)。而对同一断层来讲,由于构造运动的阶段性和不均匀性,造成其活动局限于某一段范围(王书宝等,2007),因此表现出泄压作用的分段性。从图6可以看出,沙三上亚段异常低压的分布与断裂耦合关系十分明显,且沿同一断层表现出常压与异常低压相间出现。对于储层而言,虽然油气的充注,在某种意义上讲能一定程度地起到增压作用,但断裂活动引起的泄压强度远大于增压强度,因而总体上表现出压力下降的趋势,最终出现异常低压。所以,临南洼陷异常低压的形成和演化主要受控于断裂活动。

## 5 结论

(1)临南洼陷沙三段现今发育的明显异常地层

压力在纵向上可划分为上部常压系统(埋深小于1 700 m)、中部异常低压—常压共存系统(埋深1 700~3 200 m)和下部异常低压—常压—异常高压共存系统(埋深大于3 200 m)。(2)临南洼陷沙三上亚段未经历异常高压发育阶段,而中、下亚段均在地质历史时期(30 Ma左右)便发育了异常高压,且经历了降压—增压—降压的总体演化趋势。(3)临南洼陷沙三段中发育的异常高压主要为早期烃类的生成以及烃类对储层发生充注而形成,而异常低压是异常高压经历一定地质历史时期的演化后在晚期形成,主要受断裂的多次、长期活动控制。

## References

- Chen, H. H., Dong, W. L., Zhang, S. L., et al., 2002. Application of Fluid Inclusion in Palaeopressure Modelling Research. *Oil & Gas Geology*, 23(3): 207—211 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Q. C., Lin, Y. X., Tang, H. S., 2001. Analysis of Oil Migration Direction and Accumulation Time in Linnan Area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(4): 611—616 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W., Wu, Z. P., Hou, F., 2010. Relationship between Hydrocarbon Accumulation and Linshang Fault Zone in Linnan Area, Huimin Depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 17(2): 25—28 (in Chinese with English abstract).
- Chi, G. X., Lu, H. Z., 2008. Validation and Representation of Fluid Inclusion Microthermometric Data Using the Fluid Inclusion Assemblage (FIA) Concept. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 1945—1953 (in Chinese with English abstract).
- Dai, L. C., Liu, Z., Zhao, Y., et al., 2003. Characteristics and Causes Analysis of the Abnormal Overpressure and Underpressure in Jiyang Sag. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 10(3): 158 (in Chinese with English abstract).
- Gao, G., Gang, W. Z., Fan, H. C., et al., 2008. Research Advances for the Genesis of Abnormally Low Formation Pressure in Petroliferous Basins. *Natural Gas Geoscience*, 19(3): 311—315 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Dong, W. L., 2001. Evolution, Fluid Flow and Petroleum Accumulation in Overpressured Systems in Sedimentary Basins. *Advance in Earth Sciences*, 16(1): 79—85 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Zou, H. Y., Ni, J. H., et al., 2002. Evolution of Overpressured Systems in Sedimentary Basins and Conditions for Deep Oil/Gas Accumulation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 610—615 (in Chinese with English abstract).
- Hunt, J. M., 1990. Generation and Migration of Petroleum from Abnormally Pressured Compartments. *AAPG Bulletin*, 74(1): 1—12.
- Jin, B., Liu, Z., Zhang, R. X., et al., 2004. The Anomalous Low Pressure (Negative Pressure) and Hydrocarbon Accumulation in a Sedimentary Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(3): 351—356 (in Chinese with English abstract).
- Law, B. E., Spencer, C. W., 1998. Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments. In: Law, B. E., Ulmishek, G. F., Slavin, V. I., eds., *Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments*. AAPG Memoir, 70: 1—11.
- Li, S. P., Qiu, N. S., Yin, C. H., 2003. Using Fluid Inclusion to Restore Paleo-Pressure of the Sedimentary Basin. *Mineral Resources and Geology*, 17(2): 161—165 (in Chinese with English abstract).
- Mi, J. K., Xiao, X. M., Liu, D. H., et al., 2003. Using PVT Features of Reservoir Fluid Inclusion to Model and Calculate Formation Palaeopressure of Gas Pool: Case Study from Deep Basin Gas Pool of the Upper Palaeozoic, Ordos Basin. *Science in China (Seri. D)*, 33(7): 679—685 (in Chinese).
- Munz, I. A., 2001. Petroleum Inclusions in Sedimentary Basins: Systematics, Analytical Methods and Applications. *Lithos*, 55(1—4): 195—212. doi: 10.1016/S0024—4937(00)00045—1
- Osborne, M. J., Swarbrick, R. E., 1997. Mechanisms for Generating Overpressure in Sedimentary Basins: A Re-evaluation. *AAPG Bulletin*, 81(6): 1023—1041.
- Swarbrick, R. E., Osborne, M. J., 1998. Mechanisms that Generate Abnormal Pressures: An Overview. In: Law, B. E., Ulmishek, G. F., Slavin, V. I., eds., *Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments*. AAPG Memoir, 70: 13—34.
- Thiéry, R., 2006. Thermodynamic Modelling of Aqueous CH<sub>4</sub>-Bearing Fluid Inclusions Trapped in Hydrocarbon-Rich Environments. *Chemical Geology*, 227(3—4): 154—164. doi: 10.1016/j.chemgeo.2005.09.013
- Thiéry, R., Pironon, J., Walgenwitz, F., et al., 2000. PIT (Petroleum Inclusion Thermodynamic): A New Modeling Tool for the Characterization of Hydrocarbon Fluid Inclusions from Volumetric and Microthermometric Measurements. *Journal of Geochemical Exploration*, 69—70: 701—704. doi: 10.1016/S0375—6742(00)00085—6

- Wang, J. Z., Yang, S. W., Jiang, S. B., et al., 2008. Methods for Paleopressure Reconstruction Based on Thermodynamic Simulation Technologies of Fluid Inclusion and Some Problems Needing Attention. *China Petroleum Exploration*, 13(1): 44—47 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. B., Zhong, J. H., Chen, Z. P., 2007. Characteristics of Cenozoic Fault Activities in the Huimin Subbasin. *Journal of Geomechanics*, 13(1): 86—96 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, H. Q., Liu, Z., Zhao, Y., et al., 2003. Characteristics of Geotemperature and Geopressure Fields in the Jiyang Depression and Their Significance of Petroleum Geology. *Petroleum Exploration and Development*, 30(3): 68—70 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Jiao, J. J., Xiong, H. H., 2003. Underpressure System and Forming Mechanism in the Shiwu Depression of Songliao Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(1): 61—66 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Liu, X. F., 2000. Related to Black Shale Series Fluid Dynamic System and Relationship with Accumulation of Hydrocarbon in Overpressured Basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(2): 103—108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. L., Yang, Z. C., 2008. Application of Fluid Inclusion Analysis to Hydrocarbon Accumulation Research in Huimin Depression. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 32(6): 33—39 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. K., Wang, Z. L., Yu, Z. P., 2004. Causes of Subnormal Pressure in the Sedimentary Basins. *Petroleum Geology and Experiment*, 26(5): 422—426 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. F., Liu, Z. R., Xin, Q. L., et al., 2000. Fault Activity Features and Its Control over Oil of Linnan Area in Huimin Depression. *Petroleum Exploration and Development*, 27(6): 9—11 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Liu, Z., Dai, L. C., 2004. The Analysis of the Characteristics of Subnormal Pressure and Hydrocarbon Accumulation in Linnan Subsag, Huimin Sag. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 34(6): 713—716 (in Chinese with English abstract).
- 研究中的应用. 石油与天然气地质, 23(3): 207—211.
- 陈庆春, 林玉祥, 唐洪三, 2001. 临南地区石油运移方向与成藏期次研究. *沉积学报*, 19(4): 611—616.
- 陈伟, 吴智平, 侯峰, 2010. 临南洼陷商断裂带与油气成藏的关系. *油气地质与采收率*, 17(2): 25—28.
- 池国祥, 卢焕章, 2008. 流体包裹体组合对测温数据有效性的制约及数据表达方法. *岩石学报*, 24(9): 1945—1953.
- 戴立昌, 刘震, 赵阳, 等, 2003. 济阳坳陷异常高压和异常低压特征及成因分析. *地学前缘*, 10(3): 158.
- 高岗, 刚文哲, 范泓澈, 等, 2008. 含油气盆地异常低压成因研究现状. *天然气地球科学*, 19(3): 311—315.
- 郝芳, 董伟良, 2001. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理. *地球科学进展*, 16(1): 79—85.
- 郝芳, 邹华耀, 倪建华, 等, 2002. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 610—615.
- 金博, 刘震, 张荣新, 等, 2004. 沉积盆地异常低压(负压)与油气分布. *地球学报*, 25(3): 351—356.
- 李善鹏, 邱楠生, 尹长河, 2003. 利用流体包裹体研究沉积盆地古压力. *矿产与地质*, 17(2): 161—165.
- 米敬奎, 肖贤明, 刘德汉, 等, 2003. 利用储层流体包裹体的PVT特征模拟计算天然气藏形成古压力——以鄂尔多斯盆地上古生界深盆气藏为例. *中国科学(D辑)*, 33(7): 679—685.
- 王金志, 杨少武, 蒋森堡, 等, 2008. 流体包裹体热力学模拟技术的古压力恢复方法及应注意的问题. *中国石油勘探*, 13(1): 44—47.
- 王书宝, 钟建华, 陈志鹏, 2007. 惠民凹陷新生代断裂活动特征研究. *地质力学学报*, 13(1): 86—96.
- 肖焕钦, 刘震, 赵阳, 等, 2003. 济阳坳陷地温—地压场特征及其石油地质意义. *石油勘探与开发*, 30(3): 68—70.
- 解习农, 焦赳赳, 熊海河, 2003. 松辽盆地十屋断陷异常低压体系及其成因机制. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(1): 61—66.
- 解习农, 刘晓峰, 2000. 超压盆地流体动力系统与油气运聚关系. *矿物岩石地球化学通报*, 19(2): 103—108.
- 张金亮, 杨子成, 2008. 流体包裹体分析方法在惠民洼陷油气成藏研究中的应用. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 32(6): 33—39.
- 张立宽, 王震亮, 于在平, 2004. 沉积盆地异常低压的成因. *石油实验地质*, 26(5): 422—426.
- 赵密福, 刘则容, 信荃麟, 等, 2000. 惠民凹陷临南地区断层活动特征及控油作用. *石油勘探与开发*, 27(6): 9—11.
- 赵阳, 刘震, 戴立昌, 2004. 惠民凹陷临南洼陷异常低压与油气聚集的关系. *西北大学学报(自然科学版)*, 34(6): 713—716.

## 附中文参考文献

陈红汉, 董伟良, 张树林, 等, 2002. 流体包裹体在古压力模拟