

东营凹陷牛庄洼陷地层压力演化及其成藏意义

鲍晓欢¹, 郝芳^{1,2}, 方勇²

1. 中国地质大学石油系, 湖北武汉 430074

2. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249

摘要: 东营凹陷牛庄洼陷现今的地层压力垂向分带、平面分区, 地层超压与 E_{s4} 上和 E_{s3} 下亚段成熟烃源岩分布密切相关, 并以洼陷周围的大型控洼断层为界, 洼陷内超压强烈, 洼陷外超压程度明显减弱。正演模拟表明, 洼陷内超压演化总体上经历了早期形成—下降调整—晚期再次增大 3 个阶段, 超压成因机制上从以欠压实为主发展到现今欠压实和生烃作用双重控制, 而控洼断层和 E_{s3} 中亚段下部富泥型地层形成的侧向和垂向封闭, 控制了超压的空间分布状态。超压为 E_d 末期及 N_g 末— N_m 二次重要成藏期的油气运移提供了重要的源动力; 超压演化与构造活动演化的相互耦合控制了牛庄洼陷附近断阶带上的油气成藏。

关键词: 牛庄洼陷; 超压; 地层压力演化。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2007)02-0241-06

收稿日期: 2006-03-30

Evolution of Geopressure Field in Niuzhuang Sag in Dongying Depression and Its Effect on Petroleum Accumulation

BAO Xiao huan¹, HAO Fang^{1,2}, FANG Yong²

1. Department of Petroleum Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Natural Resources and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: The present geopressure field in Niuzhuang sag in Dongying depression can be divided into dissimilar zones vertically and different areas horizontally. Overpressure is closely related to both the upper part of the fourth member and the lower part of the third member of Shahejie Formation whose source rocks matured. Large scale faults surrounding Niuzhuang sag limit the horizontal overpressure distribution. Inside the sag it is strongly overpressured while outside it is much less overpressured. The forward modeling indicates that the overpressure evolution in the sag is divided into three stages: original forming, meta declining and latest raising stages. And the main mechanism for generating overpressures evolved from undercompaction into combination of both undercompaction and hydrocarbon generation. Meanwhile, both lateral seal by large scale faults surrounding Niuzhuang sag and vertical seal by the thick and shale enriched bottom layer of the middle part of the third member of Shahejie Formation determined the special distribution of overpressure. The overpressure in Niuzhuang sag provided the petroleum migration with original forces in those two important accumulation periods. Coupling of overpressure evolution and tectonic activities played an active role in petroleum accumulation in the bordering faulted zone near Niuzhuang sag.

Key words: Niuzhuang sag; overpressure; evolution of geopressure field.

油气成藏是一个动态过程, 超压是油气成藏的重要动力。20 世纪 90 年代以来, 超压的发育机制是石油地质学的重要前沿研究领域(郝芳等, 2002), 有些生压机理在沉积盆地超压发育、演化过程中的实际贡献和意义存在争议(郝芳等, 2005), 但目前普遍接受的是, 非挤压型盆地中欠压实和生烃作用是能独立形成大规模超压的原因(郝芳和董伟良, 2001; 郝芳等, 2005)。通过研究超压的动态演化历史, 揭示

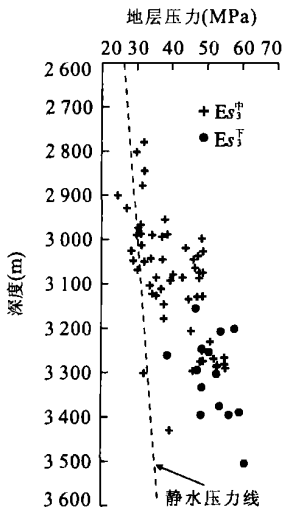


图 1 实测压力 - 深度交会图

Fig. 1 Crossplot of real pressure and depth

超压成因机制的时空变化,能更好的明确油气成藏机理,为油气勘探服务.

本文以东营凹陷中的牛庄洼陷为例,从对现今地层压力场的空间分布特征分析入手,利用 IES 盆地模拟软件对牛庄洼陷的地层超压的发育演化进行了正演模拟,对超压演化特征、深层次的成因机制和控制因素变化进行了系统研究.

1 现今地层压力分布

牛庄洼陷位于东营凹陷东段南部,南北两侧均

受断层控制,北面以 NE 走向、西北倾的现河断层为界与中央隆起带相邻,南面以陈官庄 - 王家岗断阶带为界与南部斜坡相接.洼陷内构造简单,断裂欠发育.根据牛庄洼陷内实测地层压力,地层压力垂向分带如图 1. 大约以 2950 m 左右为界,Es3 中亚段上部及其上覆地层处于静水压力环境,属常压带;Es3 中亚段下部地层开始出现超压,地层超压程度向深部逐渐增大,地层埋深超过 3150 m 的 Es3 下亚段地层压力系数普遍可达 1.5.

平面上(图 2),牛庄洼陷内部 Es3 下亚段地层超压程度高,压力系数普遍大于 1.5,局部地区可高达 1.7. 一方面,地层超压由洼陷向南部斜坡方向减小;另一方面,较大的边界控洼断层两侧压力存在明显差异,洼陷带一侧超压程度高,而洼陷外超压程度明显降低.

牛庄洼陷地层超压垂向分带,与源岩地层相关;平面分区,以洼陷周围的大型控洼断层为界,洼陷内普遍发育超压.

2 地层压力演化

根据本区构造沉积演化历史(林畅松等,2003),在前人对本区热史(李善鹏和邱楠生,2003a,2003b;邱楠生等,2004;翁庆萍等,2004;龚育龄等,2005)的研究基础之上,以现今实测地层压力作为检验约束条件,利用 IES 盆地模拟软件一维模块,对

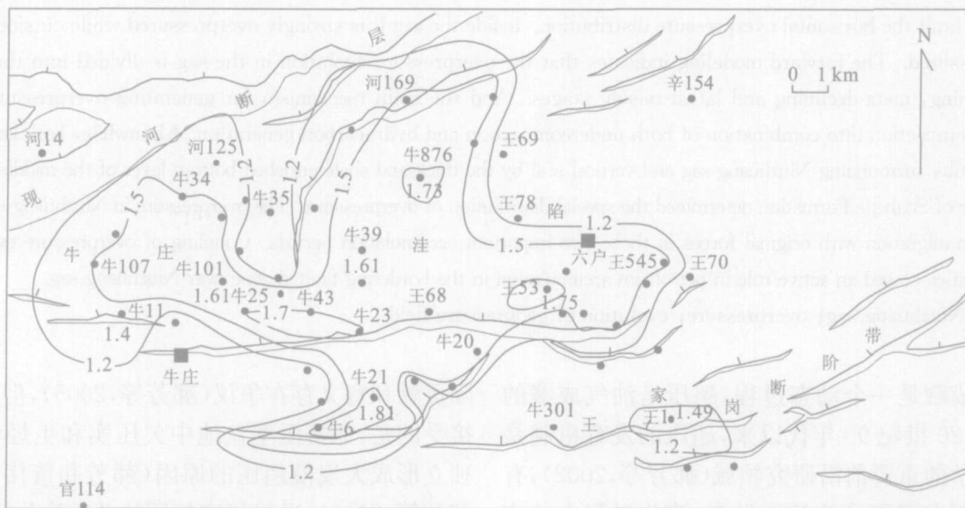


图 2 牛庄洼陷 Es3 下亚段地层压力系数的平面分布

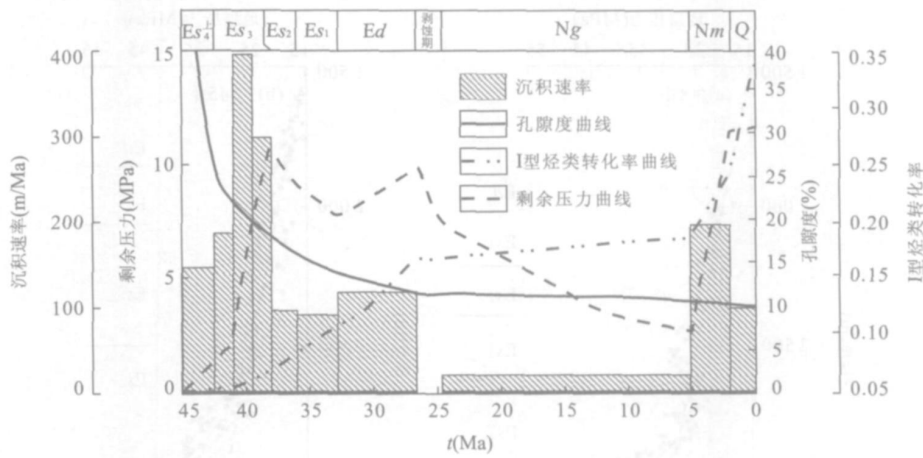


图 3 牛庄洼陷沉积速率、剩余压力、孔隙度和烃类转化率随时间的变化

Fig. 3 Changes of sedimentation rate, excessive pressure, porosity and hydrocarbon transformation ratio with time in Niuzhuang sag

牛庄洼陷的地层超压发育进行了正演模拟。根据 E_{s4} 上亚段源岩地层剩余压力演化(图 3), 可以将牛庄洼陷源岩地层的超压演化分为 3 个阶段: (1) E_d 沉积期及其以前, 剩余压力总体上不断增大, 属超压早期形成阶段; (2) E_d 末抬升剥蚀期至 N_g 末期, 剩余压力降低, 超压程度减小, 属超压下降调整阶段; (3) N_g 末期至今, 剩余压力增大, 超压再次增强, 属超压晚期发育阶段。

3 超压演化成因和现今保存机制分析

在沉积盆地的形成演化过程中, 很多物理、化学过程都可以产生超压(Hunt, 1990; Osborne and Swarbrick, 1997; 张厚福, 1998)。据统计(郝芳等, 2005), 欠压实、生烃作用以及两者的共同作用是非挤压型盆地超压发育的主要机制。新生代以来, 整个东营凹陷处于张性构造背景, 其中牛庄洼陷形成于始新世, 渐新世已具雏形, E_{s3} 中亚段地层沉积时洼陷发育至鼎盛时期, 沉积范围扩大, 沉积厚度可达 600 m。 E_{s4} 上和 E_{s3} 下亚段的细粒沉积物快速充填易于引起欠压实, 很多地区现今仍能见到明显的欠压实成因的超压(图 4)。一般认为, 砂岩不存在明显的生压机制, 其超压主要与相邻超压泥岩的压力传递作用相关。因此, 砂岩中的地层压力应不超过与之相邻的超压泥岩的地层压力值。利用等效深度法我们计算了泥岩的地层压力。计算值与试油实测的砂岩中地层压力值相比, 牛 8 井欠压实段泥岩的地层压力大于砂岩地层压力(图 4a), 很好的反映了超压泥岩中孔隙

流体向相邻砂岩层渗流时压力传递的一般规律。同处在洼陷中的王 545 井欠压实段中超过 3 000 m 处的实测砂岩地层压力大于相邻泥岩中由于欠压实成因计算的地层压力(图 4b), 反映出洼陷中超压除了与欠压实有关以外, 还与其他增压机制相关。牛庄洼陷内 E_{s4} 上和 E_{s3} 下亚段源岩地层现今埋深普遍大于 3 000 m, 温度高于 120 °C, 实测 R_o 值大于 0.5%, N_g 末期以来就处于大量生烃阶段, 牛庄洼陷的超压源区从垂向上和平面展布上无一不与洼陷内 E_{s4} 上和 E_{s3} 下亚段的成熟源岩的空间分布密切相关。

(1) 超压早期形成阶段。牛庄洼陷在 E_{s4} 和 E_{s3} 段沉积期, 发生强烈的裂隙作用, 洼陷内以咸水-半咸水的深湖、半深湖沉积充填为主, 泥质含量高, 沉积速率快(图 4)。 E_{s4} 上亚段地层经历了在浅层几百米范围内的疏松沉积物固结成岩、孔隙度下降到 30% 左右后, 经历迅速的稳定压实阶段, 在 E_{s3} 沉积末期局部就已达到 2 000 m, 孔隙度下降到约 18%。这种细粒沉积物加之快速的沉积充填, 很容易造成垂向上的排水不畅, 使得上覆地层负荷应力增大引起的孔隙体积降低速率与孔隙流体的排出速率无法达到平衡, 从而导致孔隙流体压力迅速增高, 欠压实作用明显。

到 E_{s2} 、 E_{s1} 沉积期, 整个牛庄洼陷沉积速率减缓, E_{s4} 上亚段地层在 E_{s1} 沉积末时埋深也没有达到 2 500 m, 上覆地层负荷应力的增大较前期趋缓, 同时地层泥岩孔隙度基本在 15% 以上, 孔隙度这一时期的变化也相对较小, 地层渗透性变化小, 地层欠压实状况得以缓解, 地层剩余压力有所降低。

而后 E_d 组地层沉积时期, 沉降速率再次加快,

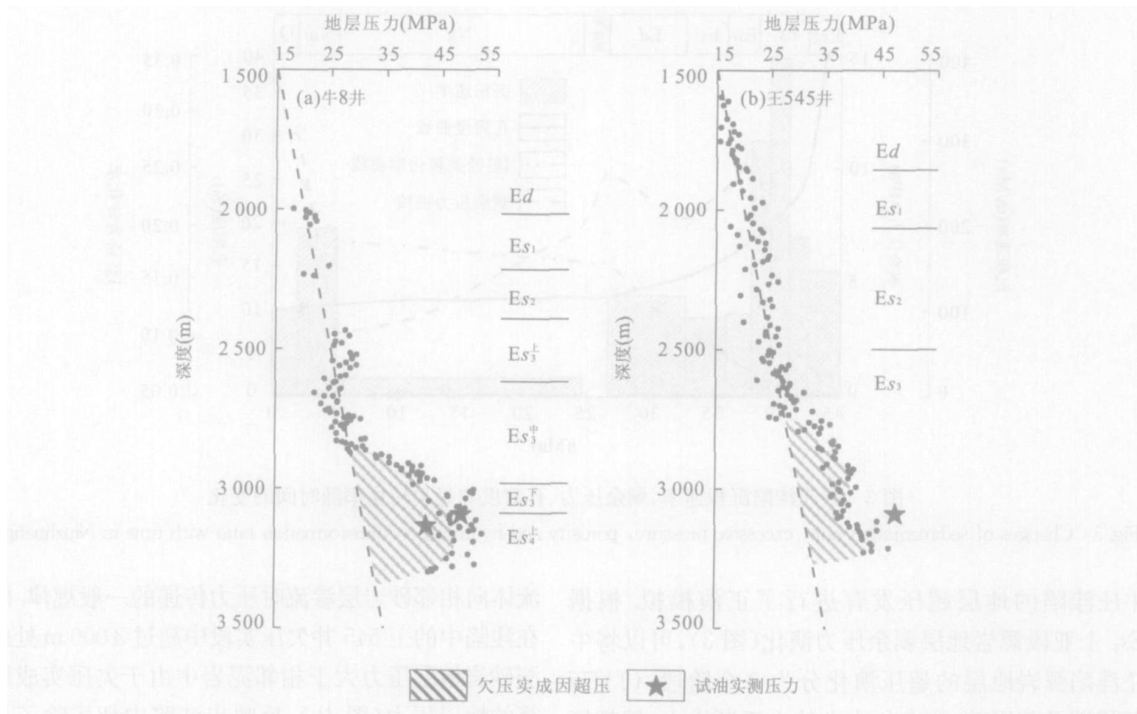


图 4 典型井中的泥岩超压带解释

Fig. 4 Overpressure interpretation in the shale in typical wells

E_{s4} 上亚段地层经历了突变压实阶段后在 E_d 沉积末期整体就已超过 2 900 m, 地层泥岩孔隙度降低至 5% 以下. 上覆地层负荷应力的增大和地层孔隙渗流条件的迅速变差, 从而导致剩余孔隙流体压力再次增高, 欠压实作用明显. 同时, 据前人研究表明(蒋有录等, 2003; 朱光有等, 2004), E_d 末期是整个东营凹陷一个重要的成藏时期. 这一时期, E_{s4} 上亚段的优质烃源岩局部成熟并排烃, 而更多的是处于低熟生烃阶段(张林晔等, 2003; 朱光有和金强, 2003). 与 N_g 末 - N_m 这一重要的成藏时期相比, 烃类转化率低, 生烃量小(图 3), 生烃不可能作为超压的又一重要成因机制. 总之, 牛庄洼陷地层超压在早期形成阶段以欠压实为主要成因, 超压程度随沉积速率的变化而变化, 沉积速率快时超压程度高, 沉积速率降低时超压程度随之降低.

(2) 压力下降调整阶段. 东营运动中, 地层抬升遭到剥蚀, 上覆地层负荷应力减小, 同时地层温度降低, 生烃作用趋于停滞, 干酪根的生烃转化率曲线表现为平直段, 岩石骨架的回弹作用(夏新宇和宋岩, 2001)也有利于超压流体的排放, 因而超压得以部分释放.

N_g 拗陷期, 沉积缓慢, 沉积速率不足 100 m/Ma, 欠压实得以缓解, 而沉积缓慢也使得 E_{s4} 上和 E_{s3} 下

亚段源岩地层埋深不及 E_d 沉积末期, 生烃增压作用微弱, 剩余压力持续减小, 超压程度继续降低.

(3) 超压晚期发育阶段. 这一阶段, 洼陷内早期深湖、半深湖环境下沉积形成的 E_{s4} 上和 E_{s3} 下亚段两套优质烃源岩埋深的快速持续增大, 地层温度升高, E_{s4} 上和 E_{s3} 下亚段烃源岩进一步成熟, 烃类转化率迅速增大, E_{s4} 上和 E_{s3} 下亚段源岩整体进入大量生烃阶段. 这两套源岩, 有机质丰度高, 有机碳含量一般大于 2%, 干酪根类型以 I 型和 II₁ 型为主, 有机质的赋存状态分为分散型和顺层富集型, 页岩和油页岩中顺层富集型有机质的有机碳含量甚至可高达 8%(苗建宇等, 1999; 朱光有和金强, 2003; 朱光有等, 2004), 为生烃增压作用提供了必要的物质基础. 现今源岩层的超压分布也反映出这样的特点: 埋藏深、生烃作用强的洼陷中心地带超压强; 埋藏浅、生烃作用较弱的部位超压弱, 洼陷以外的断阶带上 E_{s4} 上和 E_{s3} 下亚段地层埋藏更浅, 刚进入生烃门限甚至未进入生烃门限的地区则基本处于静水压力环境. 综合现今声波时差测井曲线反映的普遍欠压实情况和源岩地层压力模拟分析结果, 牛庄洼陷深部晚期发育的超压与欠压实和生烃作用两方面都密切相关.

欠压实、生烃作用是含油气盆地的超压产生的重要机制,而超压的分布状态还会因封存条件的差异而互有差别。牛庄洼陷的超压平面分布与几条控洼断层都相关,洼陷所处的断盘超压强,洼陷以外超压明显较弱,断层对超压能量形成了强有力的侧向遮挡和封闭。控洼断层两侧剩余压力和压力系数明显的差异性,反映了侧向上断层对超压的保存和分布起到了重要的控制作用。垂向上,牛庄洼陷 E_{S3} 中亚段地层中以砂泥互层沉积为特点,但明显分为上下 2 段, E_{S3} 中亚段上部地层砂质含量较大,而下部以泥岩沉积为主,且多为钙质胶结,所夹薄砂层粒度细且含泥质、灰质成分大,渗透性差。洼陷内 E_{S3} 中亚段下部地层厚度普遍在 500~700 m 之间,从地层压力与深度的交会图(图 1)中可以看出, E_{S3} 中亚段上部地层基本以常压为主,这与地层的砂岩含量较大有关,但 E_{S3} 中亚段下部 2950 m 左右的深度范围内地层超压明显增大,反映出 E_{S3} 中亚段下部地层岩性变细,渗透性变差,垂向上形成了对 E_{S4} 上和 E_{S3} 下亚段地层超压的有效封闭。

4 超压演化与油气成藏

(1)牛庄洼陷超压的 2 次强烈发育时期与 2 次重要的成藏期(E_d 末期和 N_g 末 - N_m 期)相耦合,为油气运移提供了重要的源动力。洼陷内岩性砂体发育,距离烃源岩近,成藏能量强。由于断层具有汇聚流体的趋势(郝芳等, 2005),有些岩性砂体接近断层甚至被断层切割可能更易于被油气充注。

(2)超压演化与构造活动演化的相互耦合促进了牛庄洼陷附近断阶带上的油气成藏。例如, N_g 末 - N_m 期,洼陷内 E_{S4} 上和 E_{S3} 下亚段源岩成熟进入大量生排烃阶段,随着生烃作用的增强,洼陷内超压程度不断增高。另外,控洼断层一方面有封闭超压的作用,另一方面断层活动和发育史极大的影响着油气从洼陷向构造高部位的运聚过程。王家岗断裂带在这一时期形成,断层易于活动开启。在洼陷深部超压系统中,断层是超压流体集中排放的重要优势通道。在构造活动和超压的双重控制作用下,牛庄洼陷内深层的含烃流体能往南部王家岗断阶带方向浅层快速大量运移,使得断阶带及周围地区浅部 E_{S3} 段地层水型变得与深部 E_{S4} 上亚段地层水型趋于一致,普遍为 $CaCl_2$ 型,同时,地层水矿化度高所反映的流体交换活跃区域也成油气聚集的有利地区。

5 结论

(1)牛庄洼陷超压明显,超压主要集中在 E_{S3} 中亚段下部地层及下伏的 E_{S4} 上和 E_{S3} 下亚段地层。超压演化总体上经历了早期形成 - 下降调整 - 晚期再次增大 3 个阶段。

(2) E_d 期及其以前形成的超压以欠压实为主要成因,超压程度随沉积速率的变化而变化。 N_g 末期至今的晚期超压与欠压实和生烃作用两方面都密切相关,而控洼断层和 E_{S3} 中亚段下部富泥型地层的有效封闭作用控制了牛庄洼陷超压的三维空间分布状态。

(3)牛庄洼陷超压在强烈发育时为油气运移提供了重要的源动力;超压演化与构造活动演化的相互耦合控制了牛庄洼陷南面王家岗断阶带上的油气成藏样式。

References

- Gong, Y. L., Wang L. S., Liu, S. W., et al., 2005. Mantle heat flow and deep temperature of Jiyang depression, Shandong, North China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 121 - 128 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Dong W. L., 2001. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins. *Advance in Earth Science*, 16(1): 79 - 85 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Zou, H. Y., Jin, Z. J., et al., 2005. Kinetics of hydrocarbon generation and mechanisms of petroleum accumulation in overpressured basins. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Hao, F., Zou, H. Y., Wang M. F., et al., 2002. Research advances and frontier areas of mechanisms of petroleum accumulation. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 7 - 14 (in Chinese with English abstract).
- Hunt, J. M., 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. *AAPG Bulletin*, 74(1): 1 - 12.
- Jiang, Y. L., Liu, H., Zhang Y., et al., 2003. A nalysis of petroleum accumulation phase in Dongying sag. *Oil and Gas Geology*, 24(3): 215 - 218 (in Chinese with English abstract).
- Li S. P., Qiu, N. S., 2003a. Studying the paleo geotemperature of sedimentary basin by the use of apatite fission

- track analysis; An example from Dongying depression. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 25(4): 4–8 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. P., Qiu, N. S., 2003b. Studying the palaeo-therm of Dongying sag by using vitrinite reflectance. *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 18(6): 9–11 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Zheng, H. R., Ren, J. Y., et al., 2003. The control of syndepositional faulting on the Eocene sedimentary basin fills of the Dongying and Zhanhua sags, Bohai bay basin. *Science in China (Ser. D)*, 33(11): 1025–1036 (in Chinese).
- Miao, J. Y., Zhu, Z. Q., Liu, W. R., et al., 1999. Occurrence of organic matter and its effect on sealing ability of argillaceous rock. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(3): 478–481 (in Chinese with English abstract).
- Osborne, M. J., Swarbrick, R. E., 1997. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: A reevaluation. *AAPG Bulletin*, 81(6): 1023–1041.
- Qiu, N. S., Li, S. P., Zeng, J. H., 2004. Thermal history and tectonic thermal evolution of the Jiyang depression in the Bohai bay basin, East China. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 263–269 (in Chinese with English abstract).
- Weng, Q. P., Pang, X. Q., Leonard, J. E., 2004. Numerical modeling of lithologic deposit in the middle of the third member of the Shahejie Formation in Niuzhuang sag in Dongying depression. In: Li, P. L., Pang, X. Q., eds., *Mechanisms and exploration practice of subtle reservoirs*. Petroleum Industry Press, Beijing, 215–218 (in Chinese).
- Xia, X. Y., Song, Y., 2001. Temperature effects on geopressure during deposition and erosion. *Petroleum Exploration and Development*, 28(3): 8–11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., 1998. *Development of petroleum geology*. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, L. Y., Jiang, Y. L., Liu, H., et al., 2003. Relationship between source rock and oil accumulation in Dongying sag. *Petroleum Exploration and Development*, 30(3): 61–64 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Jin, Q., 2003. Geochemical characteristics of two sets of excellent source rocks in Dongying depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 506–512 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Jin, Q., Dai, J. X., et al., 2004. A study on periods of hydrocarbon accumulation and distribution pattern of oil and gas pools in Dongying depression. *Oil and Gas Geology*, 25(2): 209–215 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等, 2005. 济阳坳陷地幔热流和深部温度. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(1): 121–128.
- 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, 金之钧, 等, 2005. 超压盆地生烃动力学与油气成藏机理. 北京: 科学出版社.
- 郝芳, 邹华耀, 王敏芳, 等, 2002. 油气成藏机理研究进展和前沿研究领域. *地质科技情报*, 21(4): 7–14.
- 蒋有录, 刘华, 张乐, 等, 2003. 东营凹陷油气成藏期分析. *石油与天然气地质*, 24(3): 215–218.
- 李善鹏, 邱楠生, 2003a. 磷灰石裂变径迹方法研究沉积盆地古地温——以东营凹陷为例. *西南石油学院学报*, 25(4): 4–8.
- 李善鹏, 邱楠生, 2003b. 应用镜质体反射率方法研究东营凹陷古地温. *西安石油学院学报(自然科学版)*, 18(6): 9–11.
- 林畅松, 郑和荣, 任建业, 等, 2003. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制. *中国科学(D辑)*, 33(11): 1025–1036.
- 苗建宇, 祝总祺, 刘文荣, 等, 1999. 泥质岩有机质的附存状态及其对泥质岩封盖能力的影响. *沉积学报*, 17(3): 478–481.
- 邱楠生, 李善鹏, 曾溅辉, 2004. 渤海湾盆地济阳坳陷热历史及构造—热演化特征. *地质学报*, 78(2): 263–269.
- 翁庆萍, 庞雄奇, Leonard, J. E., 2004. 东营凹陷牛庄洼陷沙三段中亚段岩性油藏数值模拟研究. 见: 李丕龙, 庞雄奇. *隐蔽油气藏形成机理与勘探实践*. 北京: 石油工业出版社, 215–218.
- 夏新宇, 宋岩, 2001. 沉降及抬升过程中温度对流体压力的影响. *石油勘探与开发*, 28(3): 8–11.
- 张厚福, 1998. *石油地质学新进展*. 北京: 石油工业出版社.
- 张林晔, 蒋有录, 刘华, 等, 2003. 东营凹陷油源特征分析. *石油勘探与开发*, 30(3): 61–64.
- 朱光有, 金强, 2003. 东营凹陷两套优质烃源岩层地质地球化学特征研究. *沉积学报*, 21(3): 506–512.
- 朱光有, 金强, 戴金星, 等, 2004. 东营凹陷油气成藏期次及其分布规律研究. *石油与天然气地质*, 25(2): 209–215.