

文章编号:0253-9985(2005)03-0317-06

## 临盘油田夏38井区辉绿岩热效应对成烃作用的影响

曹学伟<sup>1</sup>, 胡文瑄<sup>1</sup>, 金之钧<sup>2</sup>, 朱东亚<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:** 济阳坳陷临盘油田夏38井区沙河街组三段辉绿岩侵入体对上、下烃源岩的显微有机质和镜质体反射率的影响非常显著, 影响的范围大致与岩床厚度相当。在靠近岩床10 m范围内, 镜质体反射率( $R_o$ )值比正常地温场条件下升高1至数倍, 最高可达3.44%。远离岩床烃源岩受热影响强度逐渐降低, 直至50 m以外趋于正常地温值。由于扩散、对流条件等存在差异, 岩体对上覆岩层影响范围大, 但幅度小; 对下伏岩层影响范围小, 但幅度大。在岩浆热能影响下, 快速形成的烃类在碳数分布上具有“头大尾巴长”的特点, 即以中-轻烃为主, 重烃含量明显偏少。与正常地温场缓慢生成烃类的轻、重烃平衡、对称的分布模式明显不同。理论估算, 岩浆带来的热量足以使侵入体附近5倍于岩床体积的烃源岩升高200℃, 但由于孔隙流体的对流散热, 温度升高的幅度比理论计算值要小。

**关键词:** 热效应; 镜质体反射率( $R_o$ ); 可溶烃特点; 辉绿岩床; 烃源岩; 临盘油田

**中图分类号:** TE112.1

**文献标识码:** A

normal geotemperature over 50m away from the sill. As a result of different diffusion and convection conditions, influences of the sill on overlying rocks are large in scope but low in intensity; while that on underlain rocks are small in scope but high in intensity. Hydrocarbons that have been generated rapidly under the influence of magmatic thermal energy are mainly of medium-light hydrocarbons, while heavy hydrocarbons are obviously less. Such hydrocarbon distribution pattern is clearly different from that generated slowly in normal geothermal fields, which shows symmetrical distribution with balanced light and heavy hydrocarbons. Theoretical calculation shows that the thermal energy from magma might sufficiently cause the temperature of source rocks nearby with a volume of 5 times that of the intrusion to rise 200℃. The real increase of temperature, however, might be smaller than the theoretical calculation results.

**Key words:** thermal effect; vitrinite reflectance ( $R_o$ ); characteristics of soluble hydrocarbons; diabase sill; source rocks; Linpan oilfield

关于岩浆热液活动促进或影响成烃作用的研究已早有报道, 如 Simonneit 等<sup>[1~3]</sup>报道了加州

Guaymas Basin 发现热液石油的消息, 并发表了有关石油的定年研究成果。中国学者张景廉等<sup>[4,5]</sup>

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展规划项目(G1999043309)

第一作者简介: 曹学伟, 男, 31岁, 硕士, 地质与测量

收稿日期: 2005-03-12

曾论述热液烃的形成机理应该是一种重要的成烃作用方式;王有孝等<sup>[6]</sup>也发现“异常地热对沉积有机质的生烃过程和烃类成熟作用有明显影响”。冯乔等<sup>[7]</sup>认为“侵入体余热可以使生油层早熟,并使其附近围岩中的有机质丰度降低;李亚辉<sup>[8]</sup>也提出“辉绿岩侵入体能加速有机质的成熟;胡文瑄等<sup>[9]</sup>还发现海底锰结核中含有与热液活动相关的烃类,进一步说明了这种烃分布的广泛性。因此,探讨岩浆热液活动与成烃作用的关系不仅是一个很有意义的理论问题,也具有重要勘探意义。

抛开岩浆活动对油气形成的破坏作用不谈,从正面效应来说,岩浆热液对于烃类形成的贡献无外乎两个方面,一是岩浆热液带来的大量热能促进有机质成烃演化,二是它们带来了部分成烃物质(如  $H_2$ )直接参与成烃过程<sup>[10]</sup>。对于后一种情况金之钧等<sup>[11]</sup>曾就热液加氢作用开展了实验研究工作,本文不予涉及。现试图通过对临盘油田夏38井区辉绿岩侵入体与沙河街组三段(以下简称沙三段)烃源岩相互关系的研究,定量分析岩浆热能对成烃演化作用所带来的热量及其对烃源岩影响的范围和程度。

## 1 地质概况

临盘油田是济阳拗陷的重要油气富集区之一,产于惠民凹陷。该凹陷是一个沉降中心偏北,轴向北东东的不对称断陷盆地。基本石油地质情况与东营凹陷相似<sup>[12]</sup>,主要烃源岩是沙三段中部富有机质的湖相泥岩和油页岩,东营晚期开始生烃,明化镇期为主要成藏期。生储盖组合发育良好,从沙河街组四段(以下简称沙四段)到东营组共有6套生储盖组合,其中,以沙三段的生储盖组合最佳,储集了该区绝大部分油气。

惠民凹陷是一个凹陷中心生油向四周运聚的典型含油气凹陷。围绕凹陷中心形成了临盘、临南、商河、玉皇庙、江家店和曲堤6个次级油田。其中,本文研究的夏38井区位于凹陷南侧的临南油田。

惠民凹陷从沙河街早期至馆陶期不仅火山岩发育,而且侵入岩也很发育。特别是凹陷东北部的商河油田,火山岩和侵入岩最为集中,并发育以火山岩为储层的商741油藏。凹陷内部也有火山

岩和侵入岩形成,夏38井区的辉绿岩侵入体便是其中一例。

夏38井区辉绿岩侵入体是临南洼陷东南部的一个较大的侵入体。根据夏38、夏381、夏382、夏39和夏35等钻井揭露,该侵入体走向北北西-南南东,呈岩床状插入沙三段烃源岩中(图1,2)。侵入体长约7 km,宽约3 km,分布面积约20 km<sup>2</sup>。侵入体厚度为40~70 m,平均厚度约为50 m。

该侵入体是1个多期侵入的复式岩床,由东南向西北可分为3个亚相:细晶边缘相、中晶过渡

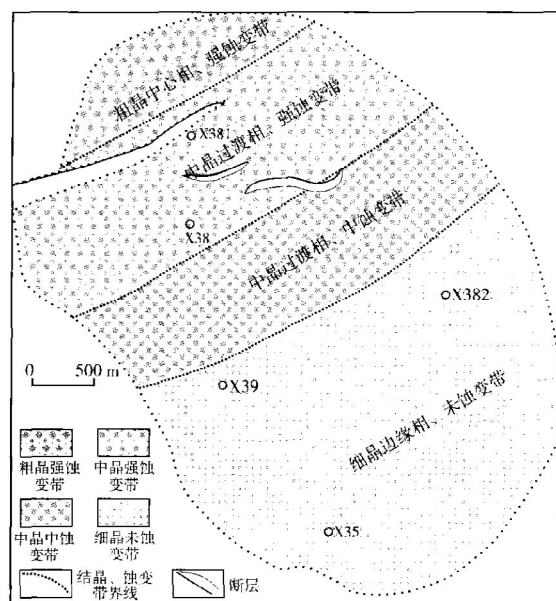


图1 夏38井区辉绿岩侵入体平面分布与岩相带划分  
Fig.1 Lateral distribution of diabase intrusion and division of lithofacies zones in Xia 38 wellblock.

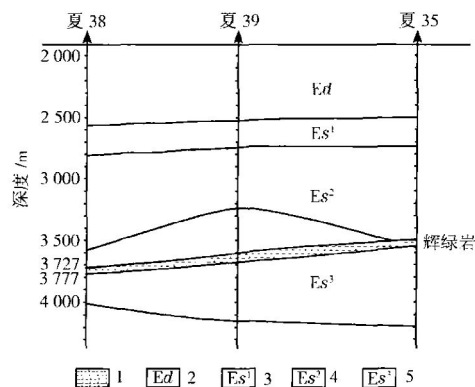


图2 夏38井区辉绿岩侵入体剖面分布图  
Fig.2 Distribution of diabase intrusion in the Xia38 wellblock cross section

相和粗晶中心相(图1)。边缘亚相为隐晶-细粒结构辉绿岩、气孔-杏仁构造煌斑岩、辉绿岩岩相组合;过渡亚相为中粒斑状辉绿岩、中-粗粒雪花状辉绿岩岩相组合;中心亚相为中-粗粒雪花状辉绿岩岩相组合。

该辉绿岩床中有烃类充注,主要储集于长石和铁镁矿物晶体之间的粒间孔隙和构造破碎形成的裂隙和裂缝中。李春光<sup>[13]</sup>和陈庆春等<sup>[14]</sup>曾对其储层特点和形成机制做过分析和研究,认为热液蚀变作用的溶蚀和淋滤是使其孔渗性大大改善的主要原因,为油气的储集提供了有效的空间。辉绿岩床油源来自附近沙三段烃源岩。

## 2 对附近烃源岩的影响

作者以夏 38 井为例,在辉绿岩床上、下采集了 22 件烃源岩样品(上、下各 11 件),进行显微有机质特征鉴定和镜质体反射率测试,样品分布及分析结果见图 3。从图 3 可以清楚地看出,辉绿岩侵入体对附近烃源岩热演化的确起到很大促进作用,其上、下烃源岩中有机显微组分都有明显热蚀变特征,镜质体反射率都有升高,特别是岩床附近,有机显微组分的变化非常明显,甚至出现沥青化和炭化现象。但是岩床上、下影响程度有所不同,岩床之上的烃源岩受影响的范围广而强度小。

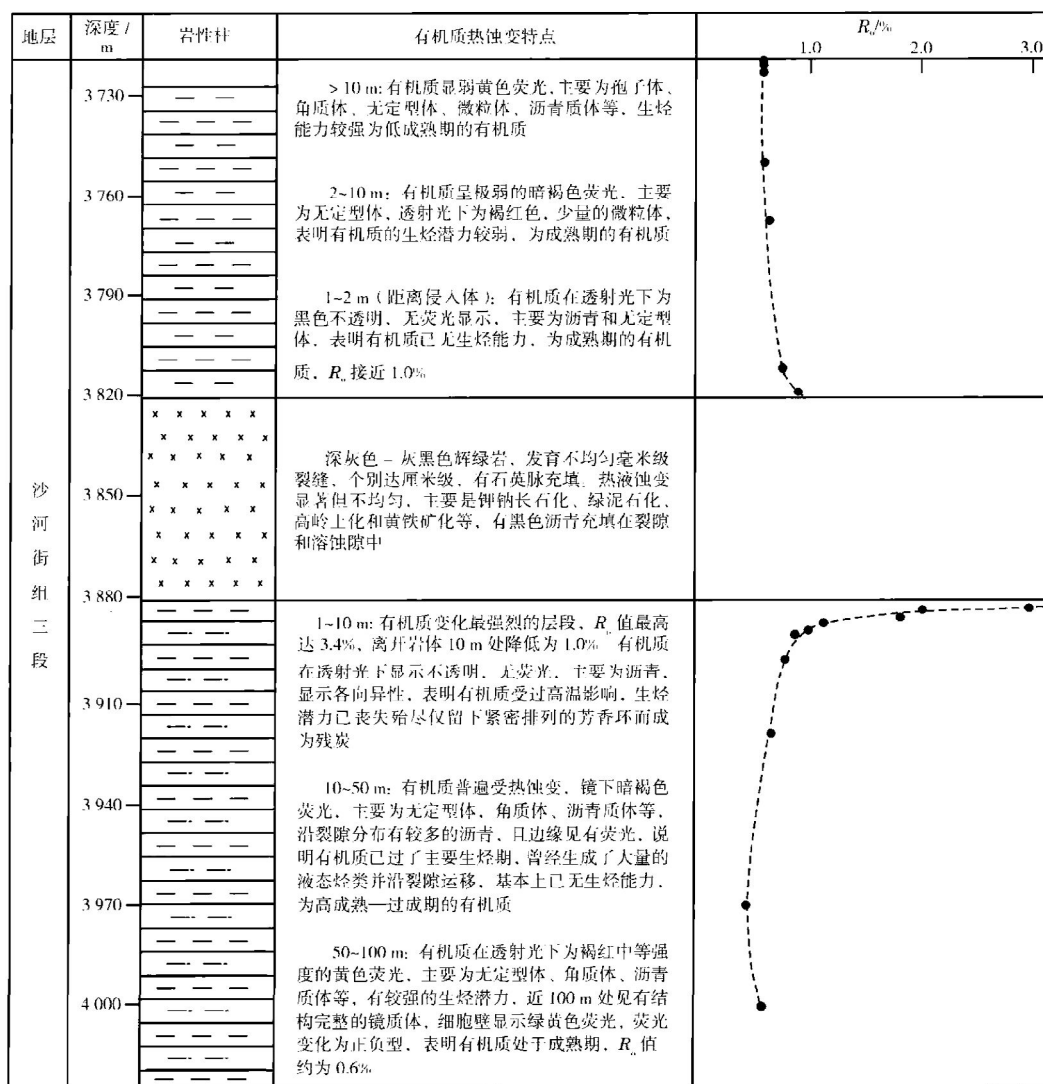


图3 辉绿岩侵入体上下岩性变化情况及镜质体反射率变化规律

Fig.3 Lithological changes and Ro variations above and below the diabase intrusions

如图3所示,岩床之上100 m范围的烃源岩 $R_o$ 值都在0.6%之上或其附近(深部3 970 m处正常地温下烃源岩 $R_o$ 值不到0.5%),但岩床附近烃源岩最高的 $R_o$ 值在1.0%附近,比正常地温下的演化值高出约50%;而岩床之下的情况有所不同,其影响范围相对较小,但强度很大。如图3所示,大致可以分为3段:第一段是0~10 m,受热强度大,变化也大,烃源岩 $R_o$ 值最高达3.44%,然后在10 m范围内就降低至1.0%附近;第二段是10~50 m, $R_o$ 值变化趋缓,从1.0%慢慢降至约0.6%;第三段是离开岩床50 m以外,逐渐过渡为正常地温下的有机质特征, $R_o$ 值恢复正常演化水平( $R_o$ 值约为0.5%)。

从岩相学观察也具有明显特征。岩床之下靠近岩床的烃源岩大都显黑色-灰黑色,镜下见重结晶和次生加大现象,并有绿泥石化和黄铁矿化现象,表现出一定的角岩化特点。说明岩浆热能对烃源岩产生了强烈热蚀变和改造作用。随着离开岩床距离的加大,热蚀变现象逐渐减弱,直至正常。

### 3 热蚀变可溶烃的特点

上述有机质镜质体反射率的显著变化表明,岩床附近的烃源岩在岩浆热液影响下的确发生了比较强烈的生烃作用。那么这种生烃作用形成的

烃类有何特点?与正常地温条件下的生烃产物有无差别?为了查明这些问题,作者在夏382井辉绿岩床之下采集了3件遭受热蚀变的烃源岩样品(X382-1, X382-2, X382-4)进行可溶烃抽提和分析,同时采集了该井开采的原油样品(X38-油)进行对比分析。由于所采原油来自沙三段砂岩储层,基本代表了正常地温场的生烃产物,因此可以作为背景与岩床附近烃源岩中的烃类进行对比分析以揭示两者的异同。

烃源岩的抽提与分析是在中国石化无锡石油实验室完成的,结果见表1和图4。从表1可知,

岩床附近的烃源岩仍然含有可溶烃类,但靠近岩床的样品含烃量小于远离岩床的样品,前者含烃量为 $43.6 \times 10^{-6} \sim 51.2 \times 10^{-6}$ ,而后者含烃量高达 $197 \times 10^{-6}$ 。这种情况可能表明,由于岩床强

表1 夏382井辉绿岩之下烃源岩中可溶烃含量及部分饱和烃参数

Table 1 Contents of soluble hydrocarbons and some saturation hydrocarbon parameters in source rocks under the diabase intrusion in Xia 382 well

| 样品号    | 岩性    | 沥青“A”<br>含量/ $10^{-6}$ | OEP   | Pr/C <sub>17</sub> | Ph/C <sub>18</sub> | Pr/Ph |
|--------|-------|------------------------|-------|--------------------|--------------------|-------|
| X382-1 | 灰黑色泥岩 | 51.2                   | 0.940 | 0.667              | 0.792              | 1.362 |
| X382-2 | 灰黑色泥岩 | 43.6                   | 0.923 | 0.567              | 0.718              | 1.139 |
| X382-4 | 灰黑色泥岩 | 197.0                  | 1.023 | 0.522              | 0.652              | 0.970 |

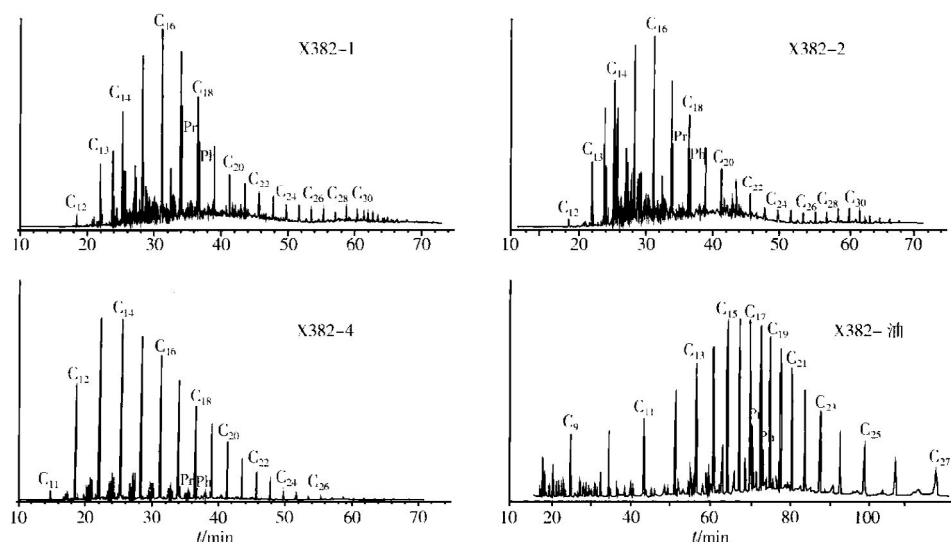


图4 夏382井热蚀变烃源岩中可溶烃的气相色谱特征及其与正常原油的对比

Fig.4 Gas chromatography features of soluble hydrocarbons from thermally altered source rocks in Xia 382 well and that of common crude.

大的热能作用,许多烃类裂解和挥发,并向远离岩床的方向扩散,因而离开岩床一定距离的地方反而可溶烃相对富集。 $\text{Pr}/\text{C}_{17}$ 、 $\text{Ph}/\text{C}_{18}$ 和 $\text{Pr}/\text{Ph}$ 也发生规律性变化,靠近岩床的样品X382-1中含量相对较高,分别为0.667、0.792和1.362,而远离岩床的样品X382-4中则明显变低,分别为0.522、0.652和0.970。从图4饱和烃气相色谱图上也可以得到一定的印证,相对远离岩床的样品X382-4中的可溶烃要比岩床附近样品X382-1和X382-2的碳数更轻,主峰左移,可能意味着岩床附近的轻烃更多的向外运移。

将3件热蚀变样品(X382-1, X382-2和X382-4)与该井的原油样品X38-油的色谱图进行对比可以发现,两者具有明显差异(图4):1)热蚀变样品中可溶烃主峰为 $\text{C}_{14}$ — $\text{C}_{16}$ ,正常原油主峰为 $\text{C}_{16}$ — $\text{C}_{17}$ ,而且前者的主峰比较尖,后者相对宽平;2)尽管热蚀变样品主峰偏轻,但是小于 $\text{C}_{12}$ 的低碳数烃类所剩无几,可能由于岩床烘烤使轻烃组分大量挥发所致,而正常原油中具有较高含量的低碳数烃类;3)如果用假想的包络线将图4中饱和烃的分布进行勾画,可以看出热蚀变样品的饱和烃具有“头大尾巴长”的特点,即以中低碳数烃类为主,中高碳数烃类明显变低,而正常原油的饱和烃分布则具有对称分布特点,即以主峰为中心向两侧呈对称展布(图5)。

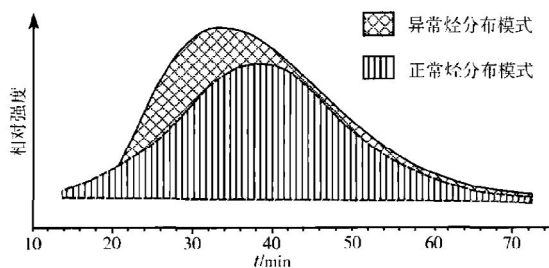


图5 热蚀变烃源岩中饱和烃和正常原油饱和烃分布模式对比图

Fig.5 Distribution pattern comparisons of saturated hydrocarbons from thermally altered source rock and from common crude oil.

## 4 讨论

### 4.1 关于岩浆带来的热量

岩浆侵入活动带来的热能可以大致分为两个方面:一是岩浆熔体所含的热量;二是伴生热流体

所含的热量。对于流体产生的热量问题, Hu Wenxuan 等<sup>[15]</sup>已作过估算,此处不再赘述。现仅考查贡献最大的岩浆熔体所含的热量。如果忽略岩浆结晶作用释放的化学潜热,整个岩体的总热量可以用岩体热容来估算。一般基性岩(辉绿岩等)的热容约为 $0.55 \text{ cal}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ,结晶温度 $900 \sim 1150^\circ\text{C}$ <sup>[16]</sup>,此处取岩浆温度 $1050^\circ\text{C}$ 为估算基数。夏38井区辉绿岩岩床体积约 $1.2 \text{ km}^3$ ,即 $1.2 \times 10^{15} \text{ cm}^3$ ,当岩浆从 $1050^\circ\text{C}$ 开始冷凝凝固,直到 $150^\circ\text{C}$ 时与外部环境达到平衡而终止,释放出的热量可达 $1.2 \times 10^{15} \text{ cm}^3 \times 900^\circ\text{C} \times 0.55 \text{ cal}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}) = 5.94 \times 10^{18} \text{ cal}$ 。这些热量将全部提供给附近烃源岩,可以使5倍于辉绿岩岩床体积的烃源岩升高约 $200^\circ\text{C}$ 。当然,由于烃源岩处于一个相对开放或半开放的环境,加之孔隙流体的对流循环将大量热能传递到更远的部位,因此岩床附近烃源岩的温度升高幅度达不到理论计算值。特别是岩床上部,由于流体对流条件比较好,热量扩散范围大,温度升高幅度相对较小。如图3所示,辉绿岩岩床使其上部100多米范围内的烃源岩 $R_o$ 值升高,岩床附近大于1.0%,100 m以外约为0.6%,而正常值为0.5%。而岩床下侧,由于板状岩床的覆盖大大限制了流体的对流强度和范围,致使有机质温度升高幅度较大,有机质镜质体反射率不但大大高于岩床上部烃源岩,而且升高的幅度也较大。如图3所示,岩床之下影响范围约50 m,  $R_o$ 值升高可达3.0%以上(靠近岩床部位)。

### 4.2 关于成烃作用时间

岩浆侵入作用虽然能够带来大量热能,使其周围烃源岩温度显著上升,但作用时间往往相对短暂,一般只有几千年至几万年,大型岩基的冷却时间才可能达到几十万元以上。因此,对于中小型侵入体来说,究竟对成烃作用产生多大影响尚存歧义。按照 Tissot 等<sup>[17]</sup>传统观点,石油的生成需要几百万年的漫长时间。但对一些现代热液生烃实例的观测结果表明,生烃作用可以在数千年内完成。例如, Simonneit 等<sup>[3]</sup>对加州 Guaymas Basin, 东北太平洋埃斯卡诺巴海槽和米德尔裂谷以及东非裂谷坦噶尼喀地堑等地区的热液石油进行了 $\delta^{14}\text{C}$ 定年研究,结果表明, Guaymas Basin 南海槽热液石油年龄平均只有4692 a, 北海槽石油年龄稍大,为7400 a, 埃斯卡诺巴海槽和米德尔裂谷

中石油的年龄分别为 17 000 a 和 29 000 a, 坦噶尼喀地堑中热液石油年龄为 25 000 a。也就是说, 这种石油形成至今才有几千至几万年的时间, 而它们的形成过程可能还要短。因此, 岩浆热液作用能够大大促进成烃作用进程是完全可以肯定的。

### 参 考 文 献

- Simoneit B R T, Brenner S, Peters K E, et al. Thermal alteration of Cretaceous black shale by basaltic intrusions in the eastern Atlantic [J]. *Nature*, 1978, 273(5 663): 501-504
- Simoneit B R T. Hydrothermal effects on recent diatomaceous sediments in Guaymas Basin: generation, migration, and deposition of petroleum, the Gulf and Peninsular Province of the California [J]. *AAPG Mem.*, 1991, 47: 793-825
- Simoneit B R T, Kvenvolden K A.  $^{14}\text{C}$  age comparison of hydrothermal petroleum [J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 21 (5): 525-529
- 张景康, 王先彬, 曹正林. 热液烃的生成与深部油气藏 [J]. *地球科学进展*, 2000, 15(5): 545-552  
Zhang Jinglian, Wang Xianbin, Cao Zhenglin. Hydrothermal hydrocarbon formation and deep petroleum prospect [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(5): 545-552
- 张景康. 论石油的无机成因 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 213-232  
Zhang Jingliao. Inorganic origin of petroleum [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001. 213-232
- 王有孝, 范璞, 程学惠, 等. 异常地热对沉积有机质生烃过程的影响 [J]. *石油与天然气地质*, 1990, 11(1): 73-77  
Wang Youxiao, Fan Pu, Cheng Xuehui, et al. Abnormal geothermal influence on hydrocarbon genesis of sedimentary organics [J]. *Oil & Gas Geology*, 1990, 11(1): 73-77
- 冯乔, 汤锡元. 岩浆活动对油气藏形成条件的影响 [J]. *地质科技情报*, 1997, 16(4): 59-65  
Feng Qiao, Tang Xiuyan. Magma activity's influence on conditions forming oil and gas pools [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1997, 16(4): 59-65
- 李业辉. 高邮凹陷北斜坡辉绿岩与油气成藏 [J]. *地质力学学报*, 2000, 6(2): 17-22  
Li Yahui. Diabase and hydrocarbon reservoir formation on the northern slope of Gaoyou sag [J]. *Journal of Geomechanics*, 2000, 6 (2): 17-22
- Hu Wenxuan, Jin Zhijun, Yao Suping, et al. Discovery of low-maturity hydrocarbon in manganese nodules and ooze from the Central Pacific deep sea floor [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(11): 939-944
- 郭占谦, 杨兴科. 中国含油气盆地的多种生烃机制 [J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(1): 50-52, 64  
Guo Zhanqian, Yang Xingke. Multi-mechanism of hydrocarbon generation of China's petroliferous basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(1): 50-52, 64
- 金之钧, 张刘平, 杨雷, 等. 沉积盆地深部流体的地球化学特征及油气成藏效应初探 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27(6): 659-665  
Jin Zhijun, Zhang Liuping, Yang Lei, et al. Primary study of geochemical features of deep fluids and their effectiveness on oil/gas reservoir formation in sedimental basins [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(6): 659-665
- 陈书平, 戴俊生, 李理. 惠民-东营盆地构造特征及控油作用 [J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(4): 344-348  
Chen Shuping, Dai Junsheng, Li Li. Tectonic features of Huimin-Dongying basin and its control over oil [J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(4): 344-348
- 李春光. 山东惠民凹陷火成岩原生油气藏 [J]. *江汉石油学院学报*, 1994, 16(1): 8-12  
Li Chunguang. The primary oil-gas reservoirs of igneous rocks within Huimin depression, Shandong province [J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 1994, 16(1): 8-12
- 陈庆春, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 试论火山岩储层的类型及其成因特征 [J]. *地质论评*, 2003, 49(3): 286-291  
Chen Qingchun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan, et al. Classification and characteristics of oil and gas reservoir beds of volcanic rocks [J]. *Geological Review*, 2003, 49(3): 286-291
- Hu Wenxuan, Jin Zhijun, Song Yucai, et al. Theoretical calculation model of heat transfer for deep-derived supercritical fluids with a case study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1): 221-229.
- 郭履灿, 詹贤望, 孙真瑞, 等. 地球物理学 [A]. 见: 张家诚, 李文范, 编. 地学基础数据手册 [C]. 北京: 海洋出版社, 1986. 27-30  
Guo Lucan, Zhan Xianjun, Sun Zhenrui, et al. Geophysics [A]. In: Zhang Jiacheng, Li Wenfan, eds. *Manual of basic geologic data* [C]. Beijing: Ocean Press, 1986. 27-30
- Tissot B P, Welte D H. *Petroleum formation and occurrence* [M]. New York: Springer-Verlag, 1978

(编辑: 李树森)