

文章编号: 0253-9985(2007)05-0664-05

塔里木盆地库车坳陷不同构造单元天然气地球化学特征

包建平¹, 朱翠山¹, 张秋茶², 李梅², 卢玉红²

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 荆州 434023)

(2. 中国石油 塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 塔里木盆地库车坳陷主要构造上的天然气地球化学特征分析结果表明, 坳陷内部大北-克拉苏构造带上的天然气中甲烷占绝对优势, 干燥系数接近于 1.00, 属于典型的干气; 而前缘隆起带上的天然气中甲烷含量相对较低, 其干燥系数一般小于 0.95, 属于典型的湿气。在碳同位素组成特征上, 大北-克拉苏构造带上天然气中甲烷、乙烷碳同位素明显偏重, 分别大于-31‰和-20‰; 比较而言, 前缘隆起带上的天然气中甲烷、乙烷碳同位素明显偏轻, 分别小于-33‰和-20‰。成熟度计算结果表明, 大北-克拉苏构造带上的天然气属于过成熟天然气, 其镜质体反射率 R_o 值为 1.65% ~ 2.25%; 而前缘隆起带上的天然气属于高成熟天然气, 其镜质体反射率 R_o 值为 1.00% ~ 1.35%。由此表明, 库车坳陷不同构造单元聚集了烃源岩中有机质在不同演化阶段生成的天然气。

关键词: 碳同位素; 成熟度; 干燥系数; 天然气; 库车坳陷; 塔里木盆地

中图分类号: TE124.1

文献标识码: A

Geochemical characteristics of natural gas from different structural units of the Kuqa Depression, the Tarim Basin

Bao Jianping¹, Zhu Cuishan¹, Zhang Qiucha², Li Mei², Lu Yuhong²

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources in Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China;

2. Institute of Petroleum Exploration & Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract Analysis of the geochemical characteristics of natural gas from the main structural units of the Kuqa Depression in Tarim Basin shows that the natural gas from Dabai-Kelasu structural belt is dominated by methane and has a dryness coefficient $[C_1/(C_1 + C_5)]$ near 1.00, indicating typical dry gas, while that from the frontal uplift zone has a relatively low content of methane and a dryness coefficient less than 0.95, indicating typical wet gas. In terms of carbon isotope compositions, the gas from the Dabai-Kelasu structural belt contains significantly heavier methane and ethane isotopes ($> -31\text{‰}$ and -20‰ , respectively), while that from the frontal uplift zone has obviously lighter methane and ethane isotopes ($< -33\text{‰}$ and -20‰ , respectively). Maturity calculation reveals that the gas from the Dabai-Kelasu structural belt belongs to overmature gases with a vitrinite reflectance ranging between 1.65% and 2.25%, while that from the frontal uplift zone belongs to highly mature gas with a vitrinite reflectance ranging from 1.00% to 1.35%. All these indicate that the natural gases in different structural units in the Kuqa Depression were generated from the organic matters in the source rocks at different thermal evolution stages.

Key words carbon isotope; maturity; dryness coefficient; natural gas; Kuqa Depression; Tarim Basin

收稿日期: 2007-07-13

第一作者简介: 包建平 (1962-), 男, 博士、教授, 石油地质与石油地球化学

基金项目: 国家“十五”重点科技攻关项目 (2001BA605A02-03-02-04)

油气勘探实践已经表明库车坳陷油气资源十分丰富,它是塔里木盆地的主要产气区,是西气东输工程的气源之一。目前已在坳陷内部的大北-克拉苏构造带、前缘隆起带上的羊塔克-英买 7-牙哈构造带及秋里塔克构造带东部的迪那和吐孜洛克构造上发现了若干个大、中型气田和凝析气田^[1~8],它们具有富气的特点,展示出良好的勘探前景。

但研究发现,库车坳陷不同构造单元所产天然气具有明显不同的地球化学特征。本文通过对坳陷内部构造大北-克拉苏构造和坳陷外部构造前缘隆起带(包括羊塔克构造、英买 7 构造和牙哈构造)上所产天然气地球化学特征的对比,揭示该坳陷天然气的分布规律,为下一步的天然气勘探提供有用的地球化学信息。

1 地质背景与油气藏特点

库车坳陷位于塔里木盆地北部的天山南麓,坳陷呈北东东向展布,东窄西宽,东浅西深,自西向东包括乌什凹陷、拜城凹陷和阳霞凹陷,总面积达 28 500 km²^[9](图 1)。库车坳陷中、新生界湖沼相沉积地层齐全,烃源岩层十分发育。湖相烃源岩主要发育在上三叠统黄山街组和中侏罗统恰克马克组;而沼泽相的煤系烃源岩主要分布在上三

叠统塔里奇克组、下侏罗统阳霞组和中侏罗统克孜勒努尔组^[7~13]。

勘探实践表明,库车坳陷不同构造单元均有天然气产出,但存在形式存在明显差异。如坳陷内部构造上以纯气藏为主;而坳陷外部构造则以凝析气藏为主,油藏较少。油气藏这一分布格局一定存在内在的地质因素。

2 天然气地球化学特征

2.1 天然气的化学组成特征

库车坳陷天然气的化学组成主要包括 C₁—C₅ 烃类气体及二氧化碳(CO₂)和氮气(N₂)等非烃气体两部分,其相对组成特征主要受成因和成熟度控制,同时由运移作用和扩散作用导致的分异也是一个重要影响因素。

统计分析结果表明,库车凹陷不同构造上的天然气在化学组成上的总体特征是相似的。如在天然气中烃类气体占绝对优势,其含量大多大于 90%;而非烃气体的含量较低,一般小于 10%。这暗示着库车坳陷不同构造单元上的天然气在成因上可能是相似的(图 2)。

但比较可以发现,库车坳陷不同构造单元上的天然气其化学组成还是存在一定差异,这些差

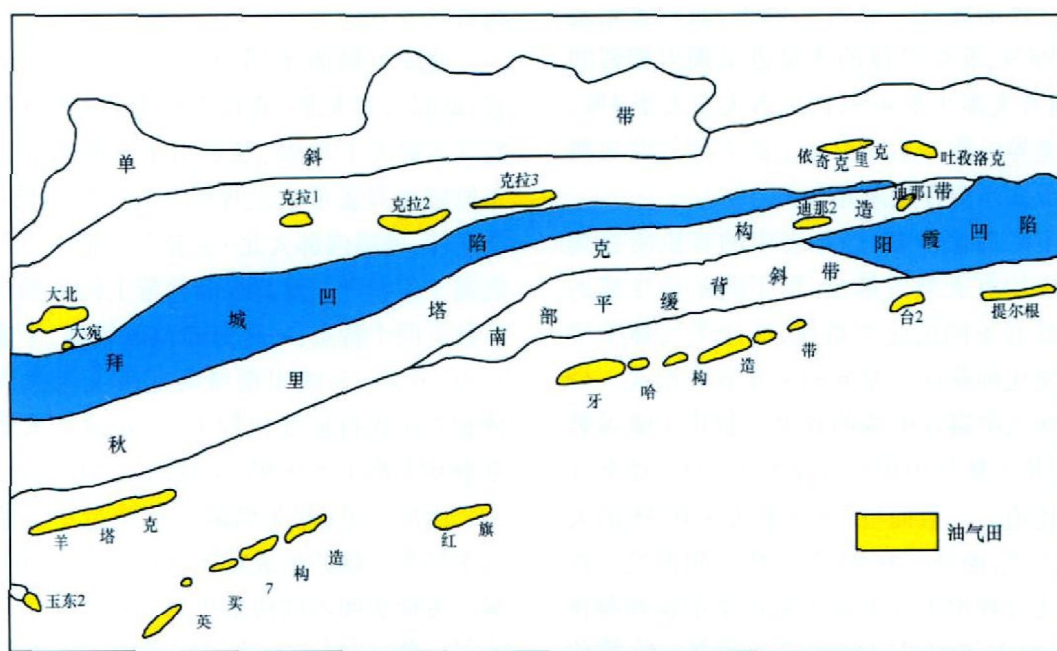


图 1 库车坳陷构造单元划分与油气藏分布示意图

Fig. 1 Sketch map showing the structural unit division and reservoir distribution in the Kuqa Depression

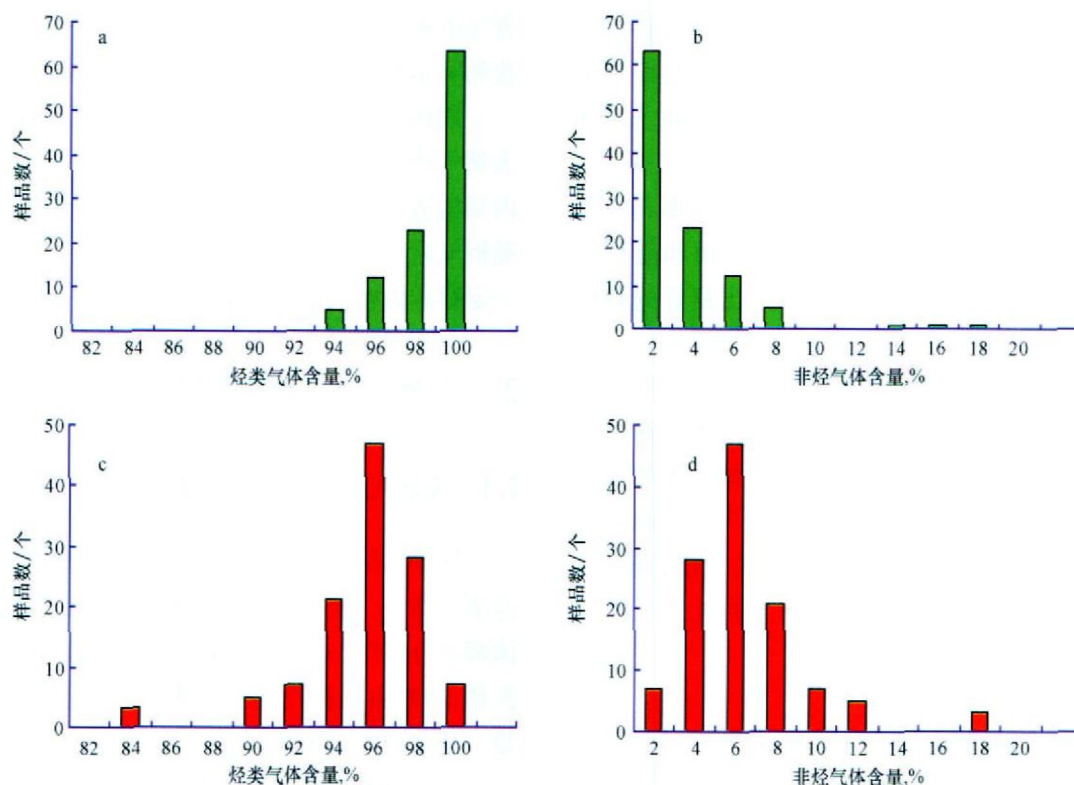


图 2 库车坳陷不同构造单元天然气烃类气体和非烃气体含量分布特征

Fig. 2 Histogram showing the distribution of hydrocarbon and non-hydrocarbon gas contents in natural gases from different structural units of the Kuqa Depression

a b 大北-克拉苏构造带; c d 前缘隆起带

异主要体现在烃类气体和非烃气体的含量上。如坳陷内部的大北-克拉苏构造带上的天然气中烃类气体的含量明显高于前缘隆起带上的天然气,前者烃类气体的含量一般大于 98%,而后者则基本都小于 98%;非烃气体的含量也呈现出相似的特征,如前者大多小于 4%,而后者大多大于 4%。这一系列差异可能与不同单元上的天然气在成熟度和运移成藏历史存在差异有关。

有机生油理论告知,烃源岩中的有机质在热演化过程中均有天然气形成,但不同阶段生成的天然气常具有不同的化学组成,而烃类气体中甲烷的含量变化则是这一差异的主要表现形式。衡量一个天然气中富含甲烷的程度一般用干燥系数来表示,它指天然气中甲烷含量与 C_1-C_5 烃类气体含量的比值。一般而言,该比值大于 0.95 的天然气称为干气,而低于 0.95 的天然气叫湿气。在有机质演化过程中湿气主要出现在生油窗和凝析油气阶段,而干气则可以出现在未成熟的生物化学生气阶段和过成熟的高温热裂解阶段。柴达木盆地涩北气田的天然气是未成熟生物气的典型代

表^[12],而四川盆地威远气田和五百梯气田的天然气则属热裂解气的代表^[12],尽管它们均属干气,但完全不同的甲烷碳同位素组成特征可以容易地把两者区分开。

就库车坳陷不同构造单元所产的天然气而言,坳陷内部大北-克拉苏构造上天然气的干燥系数基本都大于 0.95,显示出干气的特征。由于库车坳陷不具备形成大规模生物气的地质-地球化学条件,坳陷内部大北-克拉苏构造上干气不大可能属于生物气。而前缘隆起带上的天然气其干燥系数有两个特点:一是分布范围较宽,干燥系数为 0.70~0.95,反映出前缘隆起带上天然气烃类气体相对组成特征变化较大;二是这些天然气干燥系数基本都小于 0.95,呈现出湿气的特征(图 3)。

由此可见,库车坳陷不同构造单元所产天然气中烃类气体的组成特征存在显著差异。这些差异一方面表明不同构造单元所产天然气的成熟度不尽一致,同时也与不同构造单元上天然气聚集成藏历史的不同有关。前缘隆起带上的天然气大多属于凝析气,而天然气及其伴生的凝析油在成

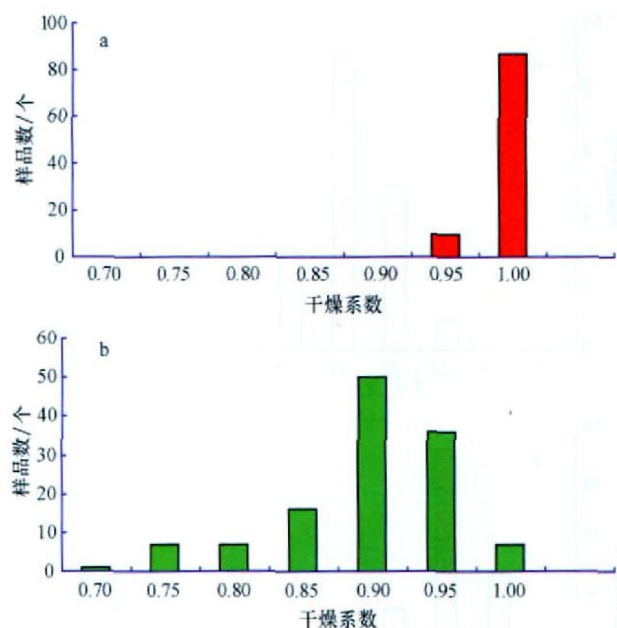


图 3 库车坳陷不同构造单元天然气干燥系数分布特征

Fig. 3 Histogram showing the distribution of dryness coefficient of natural gas of the Kuqa Depression structural units

a. 大北-克拉苏构造带; b. 前缘隆起带

因上存在明显的不一致性,即具有油气不同源现象。凝析油的形成与晚期天然气注入导致的蒸发分馏作用有关^[7]。因此,库车坳陷不同构造单元上天然气干燥系数的差异直接反映了这些天然气形成于有机质热演化的不同阶段,它们具有不同的成熟度。

2.2 天然气的碳同位素组成特征

天然气中烃类气体的碳同位素组成特征是目下研究其成因和成熟度的主要地球化学参数。大量的研究表明,天然气中甲烷的碳同位素组成主要受控于其成熟度,而 C_2^+ 重烃气体的碳同位素组成主要取决于气源岩的有机质类型^[14~19]。

库车坳陷不同构造单元天然气中烃类气体碳同位素组成特征存在明显差异。如图 4 所示,坳陷内部大北-克拉苏构造带上天然气中烃类气体的碳同位素组成明显偏重,其甲烷的 $\delta^{13}C_1$ 值均大于 -32‰ ,乙烷 $\delta^{13}C_2$ 值大于 -22‰ ,甲烷、乙烷碳同位素的差值小于 10‰ ,而坳陷外部前缘隆起带上的天然气中烃类气体的碳同位素组成明显偏轻,其甲烷的 $\delta^{13}C_1$ 值均小于 -33‰ ,乙烷 $\delta^{13}C_2$ 值小于 -20‰ ,甲烷、乙烷碳同位素的差值为 $11\text{‰} \sim 15\text{‰}$ 。库车坳陷不同构造所产天然气具有明显不

同的碳同位素组成,这一方面可能与气源岩的地球化学特征存在差异有关,而另一方面则主要是由于烃源岩的差异成熟作用和构造演化使不同构造单元所聚集的天然气来源于烃源岩的不同演化阶段。库车坳陷存在三叠系和中、下侏罗统两套湖沼相烃源岩层,其地球化学特征肯定不尽一致。层位不同和构造演化的不均一性所导致的差异成熟作用必然使得不同构造单元聚集的天然气具有不同的地球化学特征,而成熟度则是造成这一差异的主要原因。

气源岩热模拟实验和大量研究实例的统计结果表明,不同有机质类型的气源岩生成的天然气具有明显不同的碳同位素组成,且主要反映在乙烷以上的重烃气体上。因此,一般依据天然气中乙烷和丙烷的碳同位素组成特征,可把它们分成煤型气和油型气,但不同的研究者用以划分煤型气和油型气的界限不尽相同。如戴金星等^[15]把乙烷和丙烷碳同位素分别大于 -28‰ 和 -23‰ 的天然气划分成煤型气,而油型气则分别小于 -28‰ 和 -25‰ ,冯福阁等^[17]则把 $\delta^{13}C_2$ 大于 -29‰ 的天然气划分成煤型气,而把小于 $\delta^{13}C_2 - 29\text{‰}$ 的天然气划分成油型气。

对比库车坳陷不同构造单元天然气的碳同位素组成特征发现,它们的乙烷碳同位素组成均小于 -26‰ ,显示出典型的煤成气的特征。这与该坳陷三叠-侏罗系发育湖沼相沉积的地质背景是一致的。

2.3 天然气的成熟度

天然气成熟度的确定不仅是一个重要的地球化学问题,而且也是一个影响石油勘探决策的石油地质问题。烃源岩热模拟实验结果和勘探实践表明,天然气中甲烷碳同位素值的变化与有机质的热演化程度密切相关。国内外许多学者均提出过利用天然气中甲烷碳同位素组成与镜质体反射率间的关系计算天然气成熟度的相关公式。我们试图利用这些关系式来计算库车坳陷天然气的成熟度,但差异较大,同一气样的镜质体反射率相差可达数倍,表明前人提出的关系式均有自身的适用范围,可能不适用于库车坳陷的天然气。

为了获得库车坳陷天然气成熟度的相关信息,我们选用该坳陷的泥岩和煤样进行生气热模拟实验,并获得所生气甲烷碳同位素组成与相应

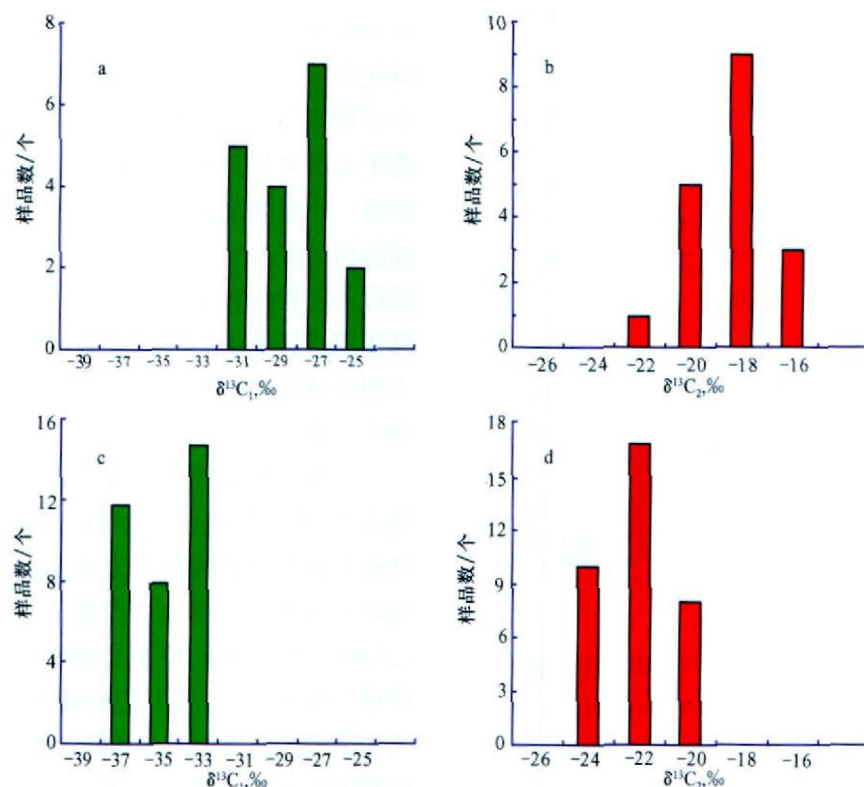


图 4 库车坳陷不同构造单元天然气甲烷、乙烷碳同位素组成分布特征

Fig. 4 Histogram showing the distribution of carbon isotope composition of methane and ethane in natural gases from different structural units of the Kuqa Depression
a b 大北-克拉苏构造带; c d 前缘隆起带

镜质体反射率 R_o 间的关系式, 据此来计算库车坳陷天然气的成熟度。

泥岩: $\delta^{13}C_1 = 16.579 \ln R_o - 38.993$ 相关系数 $R^2 = 0.9742$, $R_o > 1.00\%$

煤岩: $\delta^{13}C_1 = 13.604 \ln R_o - 37.993$ 相关系数 $R^2 = 0.9772$, $R_o > 1.00\%$

同一天然气样由两个关系式计算得到的镜质体反射率非常接近, 它们都能较好地反映天然气的成熟度。但考虑到不同性质的气源岩在地质剖面上是交互成层的, 它们几乎在相同的地质条件下发生生、排气的过程, 两种岩性的气源岩对气藏中的天然气都有贡献、很难把它们严格区分开, 为此我们采用两个参数的平均值作为衡量天然气成熟度的指标。

计算结果表明, 大北-克拉苏构造上天然气的成熟度较高, 其镜质体反射率 R_o 值为 $1.65\% \sim 2.25\%$, 属于过成熟热裂解气; 而前缘隆起带上天然气的成熟度较低, 其镜质体反射率 R_o 值大多为 $1.00\% \sim 1.35\%$, 属于高成熟热降解气。

3 结论

1) 库车坳陷内部大北-克拉苏构造带上的天然气中甲烷占绝对优势, 非烃气体含量很低, 干燥系数接近于 1.00 属于典型的干气; 而前缘隆起带上的天然气中甲烷含量相对较低, 但非烃气体含量较高, 其干燥系数一般小于 0.95 属于典型的湿气。

2) 在碳同位素组成特征上坳陷内部大北-克拉苏构造带上天然气中甲烷、乙烷碳同位素明显偏重, 分别大于 -31% 和 -20% ; 比较而言, 前缘隆起带上的天然气中甲烷、乙烷碳同位素明显偏轻, 分别小于 -33% 和 -20% 。

3) 成熟度分析结果表明, 大北-克拉苏构造带上天然气属于过成熟天然气, 其镜质体反射率 R_o 值为 $1.65\% \sim 2.25\%$; 而前缘隆起带上的天然气属于高成熟天然气, 其镜质体反射率 R_o 值为 $1.00\% \sim 1.35\%$ 。

(下转第 674 页)

试油获 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产油流, 已探明千万吨的优质规模储量。凯康凹陷北端的 Naha-1 井在 Bentu 组试油获 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产油流。所有这些展现出广阔的勘探开发前景。

参 考 文 献

- Schandermeier H, Pudlo D. The Central African Fault Zone (CAFZ) in Sudan—a possible continental transform fault [J]. *Berl Geowiss Abh A*, 1990, 120(1): 31–44
- 张亚敏, 陈发景. 穆格莱德盆地形成特点及勘探潜力 [J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(3): 236–240
- 魏永佩, 刘池阳. 位于巨型走滑断裂端部盆地演化的地质模型——以苏丹穆格莱德盆地为例 [J]. *石油实验地质*, 2003, 25(2): 129–136, 142
- Genik G J. Petroleum geology of Cretaceous–Tertiary rift basin in Niger Chad and Central African Republic [J]. *AAPG Bulletin*, 1993, 8: 1405–1434
- Gibbs A D. Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics [J]. *Journal of Structural Geology*, 1983, 5: 152–160
- Dahlstrom C D A. Balanced cross sections [J]. *Canada Journal of Earth Science*, 1969, 6: 743–757
- Chull T J R. Rift basins of interior Sudan: petroleum exploration and discovery [J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72: 1128–1142
- Woodcock N H, Schubert C. Continental strike-slip tectonics [A]. In Hancock P L, ed. *Continental deformation* [C]. Oxford, England: Pergamon Press, 1994: 251–263
- 蔡东升, 罗毓晖, 姚长华. 渤海莱州湾走滑拉分凹陷的构造研究及其石油勘探意义 [J]. *石油学报*, 2001, 2(2): 19–24
- 侯贵廷, 冯大晨, 王文明, 等. 松辽盆地的反转构造作用及其对油气成藏的影响 [J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(1): 49–53
- 刘和甫. 伸展构造及其反转作用 [J]. *地学前缘*, 1995, 2(1): 113–124
- 龙胜祥, 陈发景. 松辽盆地十屋–德惠含气带反转构造分析 [J]. *现代地质*, 1997, 11(2): 157–163
- 陈昭年, 陈发景. 反转构造与油气圈闭 [J]. *地学前缘*, 1995, 2(3): 96–102
- 陈发景, 汪新文, 陈昭年, 等. 伸展断陷盆地分析 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 52–85
- 张亚敏, 吕延仓. 东濮凹陷兰聊断裂带构造演化与油气勘探 [J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(1): 57–60
- 陈发景, 贾庆素, 张洪年. 传递带及其在砂体发育中的作用 [J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(2): 143–148
- 窦立荣, 潘校华, 田作基, 等. 苏丹裂谷盆地油气藏的形成与分布——兼与中国东部裂谷盆地对比分析 [J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(3): 255–261

(编辑 李 军)

(上接第 668 页)

参 考 文 献

- 张洪, 何顺利, 庞雄奇, 等. 克拉 2 气田成藏过程的物理模拟 [J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(1): 23–26
- 孙东胜, 金之钧, 吕修祥, 等. 库车前陆盆地迪那 2 气田成藏机理和成藏年代 [J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(5): 559–564
- Liang Digang, Zhang Shuichang, Chen Jianping et al. Organic Geochemistry of oil and gas in the Kuqa Depression of Tarim Basin, NW China [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(7): 873–888
- 杨树春, 卢庆治, 宋传真, 等. 库车前陆盆地中生界烃源岩有机质成熟度演化及影响因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(6): 770–777
- 付晓飞, 宋岩, 吕延防, 等. 塔里木盆地库车坳陷膏盐盖层特征与天然气保存 [J]. *石油实验地质*, 2006, 28(1): 25–29
- 李剑, 谢增业, 李志生, 等. 塔里木盆地库车坳陷天然气气源对比 [J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(5): 29–32
- 赵文智, 王红军, 单家增, 等. 库车坳陷天然气高效成藏过程分析 [J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(6): 703–710
- 刘文汇, 张殿伟, 郑建军, 等. 地球化学动态示踪油气成藏过程探讨——以库车坳陷大宛气构造为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(6): 717–723
- 梁狄刚, 陈建平, 张宝民, 等. 塔里木盆地库车坳陷陆相油气的生成 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 142–187
- 卢双舫, 赵孟军, 付广, 等. 塔里木盆地库车油气系统富气的主控因素分析 [J]. *大庆石油学院学报*, 2001, 25(3): 10–13
- 贾承造, 顾家裕, 张光亚. 库车坳陷大中型气田形成的地质条件 [J]. *科学通报*, 2002, 47(S0): 49–55
- 宋岩, 贾承造, 赵孟军, 等. 库车煤成烃前陆盆地冲断带大气田形成的控制因素 [J]. *科学通报*, 2002, 47(S0): 64–69
- 宋岩, 魏国齐, 洪峰, 等. 天然气地质研究与应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 211–218
- 戴金星, 陈践发, 钟宁宁, 等. 中国大气田及其气源 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 47–72
- 戴金星, 裴锡古, 戚厚发, 等. 中国天然气地质学 (卷 1) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 65–87
- 戴金星, 宋岩, 关德师, 等. 鉴别煤型的指标 [A]. *煤成气地质研究* [M]. 北京: 石油工业出版社, 1987: 156–170
- 冯福闯, 王庭斌, 张士亚, 等. 中国天然气地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 113–164
- Schoell M. The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins [J]. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1980, 44(5): 649–661
- Stahl W J. Carbon and nitrogen isotopes in hydrocarbon research and exploration [J]. *Chemical Geology*, 1977, 20(1): 121–149

(编辑 李 军)