

文章编号: 0253-2697(2012)03-0367-05

轮南地区碳酸盐岩油气藏类型对地层水特征的控制作用

刘大永¹ 陈 键¹ 彭平安¹ 肖中尧² 张宝收² 卢玉红² 张海祖² 于赤灵¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室 广东广州 510640;

2. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院 新疆库尔勒 841000)

摘要: 轮南油田下古生界中奥陶统碳酸盐岩油气藏地层水的产出较为普遍,但地层水的性质及分布规律均有明显的差异。其中轮古 7、轮古 2 井区距天窗区较近,上奥陶统剥蚀殆尽,属风化壳油气藏;而轮古东井区中奥陶统储层上覆多套上奥陶统碳酸盐岩,为埋藏型油气藏。研究区地层水的差异主要体现在风化壳油气藏与埋藏型油气藏中地层水的差异,同时随油气藏埋深加大、上覆盖层增多变厚而呈现规律性的变化。相对来讲,风化壳油气藏中的地层水具有更高的矿化度、氯离子浓度、氯溴比及锶同位素值,同时具有明显偏轻的氢、氧同位素值。不同类型油气藏,尤其是盖层差异所导致的地层水溶解过程、混合作用及水岩作用等方面的差异是导致地层水特征变化的影响因素。

关键词: 地层水;轮南油田;碳酸盐岩;风化壳油气藏;埋藏型油气藏

中图分类号: TE125.4 文献标识码: A

The control of reservoir types in Lunnan oilfield on characters of formation water

LIU Dayong¹ CHEN Jian¹ PENG Ping'an¹

XIAO Zhongyao² ZHANG Baoshou² LU Yuhong² ZHANG Haizu² YU Chiling¹

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,

Guangzhou 510640, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tarim

Oilfield Company, Korla 841000, China)

Abstract: Formation water is often accompanied with oils and gases in the Lunnan Oilfield, Tarim Basin, while reservoirs with different kinds of caprocks show apparent variations in characters and distributions of formation water. In the study area, reservoirs in the Lungu 7 and 2 Lungu blocks have little Upper Ordovician deposits due to the adjacency to upheaval and severe denudation, while Middle Ordovician reservoirs in the eastern Lungu block are overlain with multiple suites of Upper Ordovician carbonates. Therefore, they are characterized by a weathering-crust reservoir and deeply-buried reservoir, respectively, and have different formation water that varies regularly with the increase of the burial depth and overlying caprock thickness of reservoirs. Comparatively, formation water in the weathering-crust reservoir shows higher salinity, chlorine content, Cl/Br ratio and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratio, but lighter $\delta^{18}\text{O}$ and δD values than that in the deeply-buried reservoir. These variations of formation water in different reservoirs are probably attributed to the dissolution, admixture and water-rock interaction of formation water, which result from different kinds of reservoirs, particularly the difference in caprock thickness.

Key words: formation water; Lunnan Oilfield; carbonate; weathering-crust reservoir; deeply-buried reservoir

塔里木油田是中国最大的海相碳酸盐岩油气田,下古生界奥陶系碳酸盐岩储层是油气的主要赋存层位之一。轮南油田位于塔北隆起区,西北部为一个大型天窗区,南部为塔河油田,且轮南油田与其南部毗邻的塔河油田属于同一个含油气系统^[1]。塔北地区在海西期经历了强烈抬升的构造运动,造成志留系、泥盆系及上奥陶统的广泛缺失^[2]。经历长期暴露剥蚀形成轮南奥陶系大型潜山岩溶缝洞型储集体,是轮南海相碳酸

盐岩油气勘探主体^[3-4]。轮南油田构造高部位的轮古 7、轮古 2 井区中奥陶统碳酸盐岩油气藏盖层多为石炭系碎屑岩,而轮古东井区中奥陶统地层上覆一间房组、吐木休克组及桑塔木组。在轮南—塔河地区,不但烃类流体具有明显的不均质性^[5-6],同时普遍受地层水的影响。此外,塔河油田储层特征的研究也显示地层水可能对储层改造具有明显的作用^[7],地层水相关研究也表明其具有强烈的不均质性^[8-10]。

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05008-003-21)资助。

第一作者:刘大永,男,1976 年 7 月生,2005 年获中国科学院博士学位,现为中国科学院广州地球化学研究所副研究员,主要从事油气地质与地球化学研究工作。E-mail:liudayong@gig.ac.cn

通讯作者:彭平安,男,1960 年 11 月生,1991 年获中国科学院博士学位,现为中国科学院广州地球化学研究所研究员,主要从事有机地球化学研究工作。E-mail:pinganp@gig.ac.cn

1 地质概况

本项研究所采集的样品来自轮南油田(图1)。轮南奥陶系海相碳酸盐岩油气田为典型的天窗型古潜山油气藏^[11],并经历了海西期的强烈风化作用。古隆起潜山部位由东南向西北依次为石炭系中泥岩段、标准灰岩段和上泥岩段乃至三叠系所覆盖^[3]。其中除轮古东井区鹰山组以上发育了较完整的上奥陶统,为埋藏型油气藏外,轮古7、轮古2井区鹰山组与石炭系碎屑

岩,甚至在部分区域与三叠系碎屑岩直接接触,为典型的风化壳油气藏(图1)。前人研究认为地层水由天窗区沿风化面灌注到更深的部位^[11]。

轮南油田轮古东井区鹰山组所处的深度更大,鹰山组顶面发育了吐木休克组、一间房组、良里塔格组以及桑塔木组,与塔中相似,属埋藏型油气藏。从油水的运移方向来看,轮南、塔河油气的运移方向是由构造低部位向高部位运移^[12],与地层水的运移方向恰恰相反。

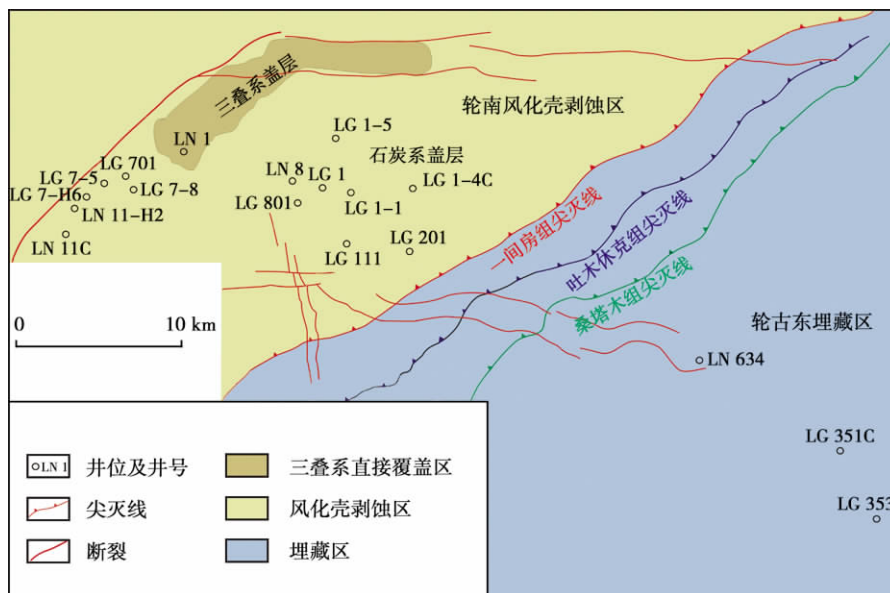


图1 轮南油田研究区位置及采样点分布

Fig. 1 Location of research area and sampling boreholes in Lunnan oilfield

2 样品与实验

轮南油田中奥陶统鹰山组的采样井分布如图所示(图1)。实验所采用的地层水均来源于自喷试采井,或电泵抽油井,并剔除了可能受酸化作用及注水影响的样品数据,可确保地层水不受钻井液等其他流体影响。

地层水过滤后再过 Waters Oasis HLB SPE 柱,以除去有机物。稀释后的样品过 H 型前处理柱,以避免重金属阳离子对离子色谱柱的破坏。地层水阴离子浓度检测仪器为 Dionex ICS900 离子色谱仪。阳离子浓度检测仪器为全直谱 ICP 发射光谱仪。采用 GV IsoPrime II 型稳定同位素质谱仪获得地层水的氢、氧同位素数据,数据的分析精度为 δD 小于 1.5% , $\delta^{18}O$ 小于 0.08% 。采用多接收器等离子体质谱(MC-ICPMS)检测锶同位素值。

3 结果与讨论

3.1 轮南不同井区地层水中无机离子特征差异

轮南油田各井区地层水均为高矿化度地层水,且

氯离子浓度差异较大。其中最明显的一个特征是轮南油田东南部轮古东埋藏区地层水总矿化度相对较低,仅为 $(12.2 \sim 16) \times 10 \text{ g/L}$ [图 2(a)]。轮古东以 LN634 井地层水的矿化度最大,而这口井的位置靠近风化壳油气藏剥蚀区的边界(图1),明显受到了邻近碎屑岩的影响,而轮古7、轮古2井区地层水总矿化度则普遍高于 $16 \times 10 \text{ g/L}$,甚至达到 $22.5 \times 10 \text{ g/L}$ 。同样,轮南各井区地层水 pH 值也具有明显的差异,分布在 $5.5 \sim 7.0$ 之间[图 2(a)]。其中风化壳油气藏中地层水 pH 值分布在 $5.9 \sim 6.57$ 之间,而埋藏区地层水的 pH 值则明显偏高,分布在 $6.69 \sim 6.85$ 之间。

同埋藏型储层相比,风化壳储层的开放性更强,从地层水的脱硫系数上也明显可以看出这一点[图 2(b)]。风化壳油气藏中地层水的脱硫系数总体明显高于轮古东埋藏区地层水,说明风化壳油气藏中地层水明显比埋藏型油气藏中地层水更为开放。

地层水的氯溴比是区分轮南下古生界不同类型油气藏中地层水最有效的指标。从图 2(b)可以看出,轮南风化壳油气藏中地层水氯溴比分布范围较大,自

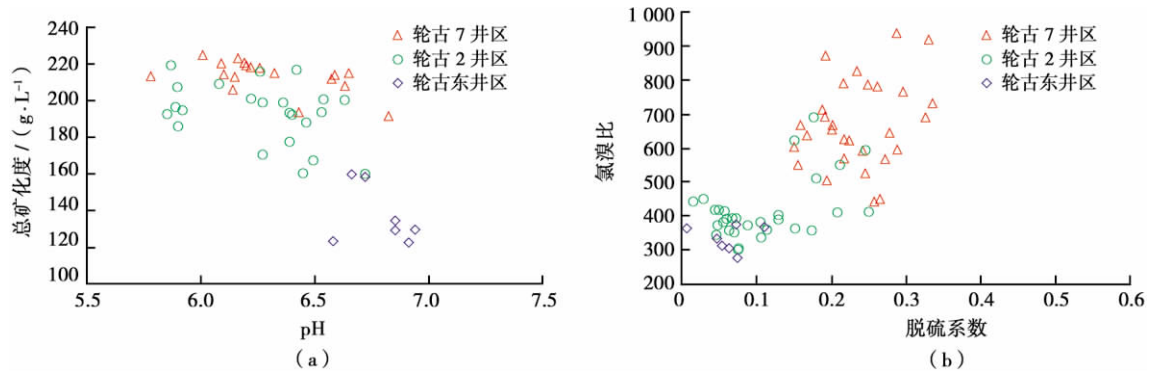


图 2 轮南油田不同井区地层水不同参数分布特征

Fig. 2 Distribution of different parameters of formation water in Lunnan oilfield

301~1000 以上均有分布,而轮南埋藏区地层水中氯溴比分布在 277~374 之间。

塔中地层水成因存在 3 个端元,即古海水、古大气降水及碎屑岩来源的地层水^[13]。海水中的氯溴比一般稳定在 292 左右,古海水的浓缩、稀释都不会改变地层水中的氯溴比值。古海水沉淀时,氯离子减少,而溴离子较为稳定,会造成氯溴比值的降低,因此地层水溶解蒸发相的膏盐层的过程则会单纯增加氯离子浓度,而导致氯溴比值的升高。从而地层水在演化过程中从流经的岩层获取氯、溴离子的差异性决定了地层水的氯溴比值。从这一角度来看,轮南下古生界碳酸盐岩储层中的地层水明显溶解了盐类。

尽管轮南地区上古生界膏盐岩地层的资料相对缺乏,但前人已经对塔北艾协克 桑塔木地区下石炭统的含盐层系进行了较为深入的研究,并建立了下石炭统含盐层系的成盐模式^[14]。塔北含盐层系的分布说明,碎屑岩中赋存盐岩的溶解能够解释轮南风化壳油气藏中高矿化度、高氯溴比的地层水。同样,对于轮古东埋藏型油气藏,未剥蚀的上奥陶统良里塔格组、桑塔木组使油气藏相对封闭,受石炭系含盐层系的影响较小,矿化度及氯溴比值均相对较低。

前人研究表明,地层水的矿化度与其所处的盆地位置具有密切的关系^[15-16],综合本项研究结果同样说明,地层水特征与油气藏盖层以及埋深有密切关系。自轮古 7、轮古 2 至轮古东油气藏埋深增加,上覆上奥陶统及上古生界盖层逐渐变厚,地层水的无机离子矿化度降低、pH 值增加、开放性降低且受上部碎屑岩的影响变弱。

3.2 轮南油田下古生界地层水氢、氧同位素特征

轮古 7 井区地层水 δD 分布约在 -50‰ ~ -34‰ , $\delta^{18}O$ 分布约在 -0.32‰ ~ 1.60‰ ; 轮古 2 井区地层水 δD 分布约在 -47.0‰ ~ -34.1‰ , $\delta^{18}O$ 分布约在 -0.77‰ ~ 2.56‰ ; 轮古东井区地层水 δD 分布约在 -40.0‰ ~ -29.8‰ , $\delta^{18}O$ 分布约在 4.84‰ ~

6.50‰ (图 3)。由以上数据可以看出,轮古 7、轮古 2 井区风化壳油气藏中的地层水氢、氧同位素值分布相似,而轮古东埋藏型油气藏中地层水则氢、氧同位素值,尤其是氧同位素值明显偏重。

轮南地层水氢、氧同位素值具有明显的正相关性关系,表明地层水为非海相成因、非浓缩成因的溶滤成因水。古海水蒸发过程中,氢、氧同位素值在逐渐变重以后出现反转,并随浓缩程度的增强而逐渐变轻^[17]。但从图 3 可以看出,轮南地层水氢、氧同位素值的分布与古海水浓缩氢、氧同位素变化的曲线具有明显的差异,说明古大气降水为轮南地层水的主要来源。

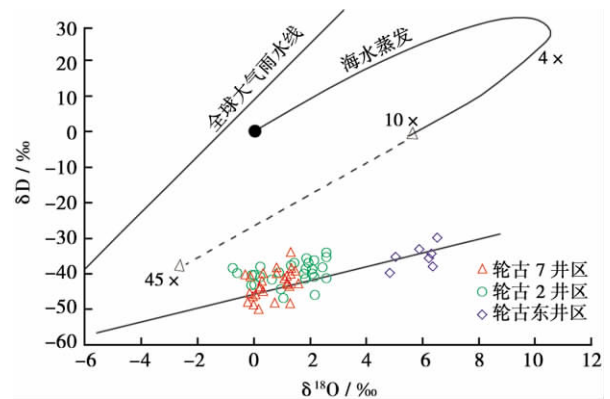


图 3 轮南地层水氢、氧同位素值

Fig. 3 δD and $\delta^{18}O$ of formation water in Lunnan oilfield

地层水氢、氧同位素值变化的几种因素:①水岩离子交换作用;②膜过滤作用造成的同位素分馏;③蒸发作用造成的同位素分馏^[18]。前人对塔里木油田碳酸盐岩围岩进行过碳、氧同位素值的测试,其中微晶灰岩的氧同位素值分布在 -4.153‰ ~ -8.64‰ (PDB 标准) 之间^[19], 转换后氧同位素值分布在 22.00‰ ~ 26.63‰ (SMOW 标准) 之间, 现有地层水氧同位素值均小于 7‰ (SMOW 标准)。因此,水岩作用越强,地层水与碳酸盐岩之间的氧同位素交换越强烈,地层水的氧同位素值越重。这与前人对于 Western Canada

盆地地层水与碳酸盐岩之间关系的研究完全一致^[20]。由此可见,埋藏区地层水氧同位素值明显重于风化壳地层水可能是由于更为强烈的水岩作用的结果。与风化壳油气藏相比,埋藏型油气藏中的地层水氢同位素值偏重则表明地层水经历了更为强烈的蒸发作用。

3.3 轮南地层水锶同位素特征差异

轮古7井区地层水锶离子浓度约在483~646 mg/L,轮古2井区锶离子浓度约在466~644 mg/L。轮古东井区锶离子浓度约在192~343 mg/L,这表明埋藏型油气藏中地层水锶离子浓度明显小于风化壳油气藏。轮古7井区地层水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分布在0.7105~0.7109,轮古2井区地层水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分布范围较广,主体分布在0.7103~0.7108,但有一口井锶同位素值为0.711630,明显高于其他风化壳油气藏中的地层水。轮古东埋藏区地层水锶同位素值分布在0.7098~0.7101,明显小于风化壳油气藏的地层水。

锶离子是地层水最主要的微量元素,锶同位素的特征既可以反映地层水的来源,又可以反映地层水所经历的演化和溶解过程^[21]。奥陶—石炭纪古海水锶同位素值的研究表明,其分布一般约在0.7077~0.709,随地层年代不同而略有差异^[22]。但地层水氢、氧同位素值表明,地层水来源的主体只能是古大气降水变质水,而不可能是成岩变质水。而成岩变质水可能存在少量的混合作用。古大气降水在演化过程中,锶同位素值受赋存地层的影响,在流经碎屑岩层系时溶解碎屑岩相对较多,地层水锶同位素特征主要体现碎屑岩中的锶同位素特征;在进入碳酸盐岩储层以后,则溶解碳酸盐岩中的锶离子,锶同位素值偏低。

轮南油田地层水体现出明显的锶同位素值与锶离子浓度的正相关关系(图4)表明,锶离子浓度越高,越

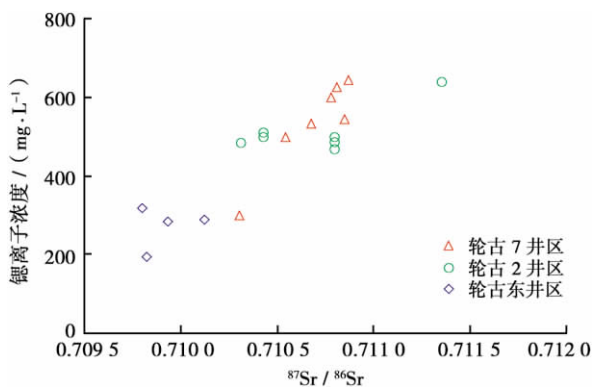


图4 轮南地层水锶同位素值与锶离子浓度

Fig. 4 Strontium concentration and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of formation water in Lunan oilfield

富集放射成因的 ^{87}Sr 。前人研究也表明较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与蒸发岩类的溶解有关^[16]。同样,古大气降水淋滤石炭系盐岩也可以解释风化壳油气藏地层水中较高的锶同位素值。而轮古东埋藏型油气藏中的地层水较低的锶同位素值则表明,地层水与储层之间的水岩作用更为强烈,同时说明地层水的来源存在更多的成岩变质水的混合。

4 结论

(1) 风化壳油气藏与埋藏型油气藏中的地层水具有很明显的差异,这种差异体现在无机离子浓度、氯溴比、氧、锶同位素值等方面。同埋藏型油气藏相比,风化壳油气藏中的地层水具有更高的矿化度、氯离子浓度、氯溴比及放射性来源的 ^{87}Sr ,同时具有明显偏轻的氧同位素值。

(2) 风化壳油气藏中地层水较高的无机离子浓度主要来源于地层水在流动过程中对碎屑岩层系,尤其是盐岩层系的淋滤溶解作用,地层水较高的氯溴比与锶同位素值也说明了这一点;埋藏型油气藏中的地层水封闭性较强,导致地层水矿化度、氯离子浓度明显偏低,较低的氯溴比及锶同位素值也说明地层水与成岩变质水的混合作用明显。

参考文献

- [1] 梁狄刚. 塔里木盆地轮南—塔河奥陶系油田发现史的回顾与展望[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 153-158.
Liang Digang. Review and expectation on the discovery of Ordovician Lunan-Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 57-63.
- [2] 严威, 王兴志, 张廷山, 等. 塔河油田加里东中期第Ⅲ幕岩溶作用[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 411-416.
Yan Wei, Wang Xingzhi, Zhang Tingshan, et al. Investigations of the karst during the Episode III of the mid-Caledonian in the Tahe oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 411-416.
- [3] 周新源, 杨海军, 韩剑发, 等. 塔里木盆地轮南奥陶系油气田的勘探与发现[J]. 海相油气地质, 2009, 14(4): 67-77.
Zhou Xinyuan, Yang Haijun, Han Jianfa, et al. Case of discovery and exploration of marine fields in China (Part 12): Lunan Ordovician oil-gas field in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(4): 67-77.
- [4] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 102-107.
Li Yang, Fan Zhihui. Developmental pattern and distribution rule of the fracture-cavity system of Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 102-107.
- [5] 陈志海, 黄广涛, 刘常红, 等. 烃类流体分布与缝洞储层流动单元

- 的划分[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 92-97.
Chen Zhihai, Huang Guangtao, Liu Changhong, et al. Distribution of hydrocarbon fluid and division of flow units in fracture-cave reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 92-97.
- [6] 苗忠英, 陈践发, 张晨, 等. 塔里木盆地轮南低凸起天然气分布规律与成藏期次[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 404-410.
Miao Zhongying, Chen Jianfa, Zhang Chen, et al. Regularity of distribution and accumulation stages of natural gases in the Lunan lower uplift of the Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 404-410.
- [7] 朱东亚, 胡文瑄, 张学丰, 等. 塔河油田奥陶系灰岩埋藏溶蚀作用特征[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 57-63.
Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Zhang Xuefeng, et al. Characteristics of burial dissolution in the Ordovician limestone of Tahe oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 57-63.
- [8] 蔡立国, 钱一雄, 刘光祥. 阿克库勒及其邻区地层水同位素特征[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 503-506.
Cai Liguang, Qian Yixiong, Liu Guangxiang. The isotopes composition formation waters in Akekule and adjacent, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(4): 503-506.
- [9] 钱一雄, 蔡立国, 顾忆. 塔里木盆地塔河油田水离子组合及参数的平面分布与油气运移[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 502-507.
Qian Yixiong, Cai Liguang, Gu Yi. Ion related parameters of formation water distribution in the Tahe oilfield and its relationship to petroleum migration[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(5): 502-507.
- [10] 朱蓉, 楼章华, 鲁新便, 等. 塔河油田缝洞单元地下水化学特征及开发动态[J]. 石油学报, 2008, 29(4): 567-572.
Zhu Rong, Lou Zhanghua, Lu Xinbian, et al. Chemical characteristics of underground water and development performance of fracture-cave units in Tahe oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4): 567-572.
- [11] 刘静江, 毛光周, 阮洋, 等. 轮南天窗型古潜山油气藏[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(2): 23-30.
Liu Jingjiang, Mao Guangzhou, Ruan Yang, et al. Lunan top-open buried hill reservoir[J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(2): 23-30.
- [12] Wang T, He F, Wang C, et al. Oil filling history of the Ordovician oil reservoir in the major part of the Tahe oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Organic Geochemistry, 2008, 39: 1637-1646.
- [13] Cai C, Franks S G, Aagaard P. Origin and migration of brines from Paleozoic strata in Central Tarim, China: constraints from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$ and water chemistry[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16: 1269-1284.
- [14] 周江羽, 韩燕英, 林忠民. 塔北地区下石炭统含盐层系的沉积演化及成盐机理[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3): 244-248.
Zhou Jiangyu, Han Yanying, Lin Zhongmin. Sedimentary evolution and salt-forming mechanism in Lower Carboniferous salt-bearing series, northern Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3): 244-248.
- [15] 王运所, 许化政, 王传刚, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界地层水分布与矿化度特征[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 748-754.
Wang Yunsuo, Xu Huazheng, Wang Chuangang, et al. Characteristics of the salinity and distribution of the Neopaleozoic formation water in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 748-755.
- [16] Barnaby R J, Oetting G C, Gao G. Strontium isotope signatures of oil-field waters: applications for reservoir characterization[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(12): 1677-1704.
- [17] Birkle P, García B M, Padrón C M M, et al. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecminoacán oil reservoir, Gulf of Mexico: Part 2: isotopic and field-production evidence for fluid connectivity[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24: 555-573.
- [18] Ziegler K, Coleman M L, Howarth R J. Paleohydrodynamics of fluids in the Brent Group (Oseberg Field, Norwegian North Sea) from chemical and isotopic composition of formation waters[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16: 609-632.
- [19] 刘存革, 李国蓉, 朱传玲, 等. 塔河油田中下奥陶统岩溶缝洞方解石碳、氧、锶同位素地球化学特征[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2008, 33(3): 377-386.
Liu Cunge, Li Guorong, Zhu Chuanling, et al. Geochemistry characteristics of carbon, oxygen and strontium isotopes of calcites filled in karstic fissure-cave in Lower-Middle Ordovician of Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(3): 377-386.
- [20] Hitchon B, Friedman I. Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin—I: stable isotopes of hydrogen and oxygen[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1969, 33: 1321-1349.
- [21] Dogramaci S S, Herczeg A L. Strontium and carbon isotope constraints on carbonate-solution interactions and inter-aquifer mixing in groundwaters of the semi-arid Murray Basin, Australia[J]. Journal of Hydrology, 2002, 262: 50-67.
- [22] Denison R E, Koepnick R B, Burke W H, et al. Construction of the Silurian and Devonian seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve[J]. Chemical Geology, 1997, 140: 109-121.

(收稿日期 2011-10-28 改回日期 2012-01-18 责任编辑 张怡)