

# 轮南油田深埋风化壳储集层地质条件 对地层水混合的控制作用

刘大永<sup>1</sup>, 陈键<sup>1</sup>, 彭平安<sup>1</sup>, 李恒超<sup>1</sup>, 肖中尧<sup>2</sup>, 张宝收<sup>2</sup>, 卢玉红<sup>2</sup>

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, 广州 510640;

2. 塔里木油田勘探开发研究院实验中心, 新疆 库尔勒 841000

**摘 要:** 碳酸盐岩深层风化壳油气藏普遍出水, 严重影响油气的开采, 因此地层水赋存规律及其与储集层的关系对于油气的勘探开发具有重要意义。本研究以轮南风化壳油气藏为例, 选取构造位置具有明显差异的轮古7和轮古2井区进行地层水的对比研究, 并对地质条件与地层水特征的关系进行了讨论。在14个月的跨度内, 对研究区各开采井地层水进行了6次采样及分析测试工作。结果表明, 同轮古2井区相比, 构造高部位的轮古7井区各钻井同一时间出水特征相对集中, 且不同时间各钻井出水特征的变化不大; 同时具有明显偏高的氯溴比及脱硫系数。表明构造高部位的轮古7井区储集层连通性更好, 同时开放性更强, 与上部地层盐岩溶解水的混合作用更为明显。不同构造位置的地层水特征明显受地质条件的控制, 并反映出地层水所在储集层埋藏越深, 石炭系砂泥层厚度越大, 储集层的开放性及其连通性越差。

**关 键 词:** 地层水; 碳酸盐岩; 轮南; 风化壳储集层; 连通性

中图分类号: P618.130.2<sup>+</sup>1 文章编号: 1007-2802(2016)05-0890-07 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.05.009

## Geology of Deeply Buried Weathering Reservoir in the Lunnan Oilfield and Its Controls on the Mixing of Formation Waters

LIU Da-yong<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1</sup>, PENG Ping-an<sup>1</sup>, LI Heng-chao<sup>1</sup>, XIAO Zhong-yao<sup>2</sup>, ZHANG Bao-shou<sup>2</sup>, LU Yu-hong<sup>2</sup>

1. *The State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of sciences,*

*Guangzhou 510640, China;* 2. *PetroChina Tarim Oilfield Company, Kuerle Xinjiang 841000, China*

**Abstract:** Formation water invasion is common in production wells, which rise concerns about future production potential of hydrocarbon resources. Thus, the preservation regularity of the formation water and the relationship between the reservoir and hosted formation water are very important. A comparative study of the variation of formation waters in Lungu7 (LG7) and Lungu2 (LG2) wellblocks are conducted in order to address relationship between the characteristics of formation water and geological setting. These two wellblocks are located at structural location of the Lunnan Oilfield: The LG7 wellblock is located at the tectonic high position with Carbonaceous layer partly wedge out, whereas the LG2 wellblock is located at the tectonic lower position with thicker Carbonaceous layer. The formation water in all producing wells at LG7 wellblock have similar chlorine concentration over time, suggesting that the producing wells in LG7 wellbolck have good connectivity. On the contrary, the formation water in producing wells at LG2 wellblock are highly variable in composition, indicative of poor connectivity of LG2 reservoir. Formation water in LG7 wellblock has higher Cl/Br ratios and coefficient of desulfurization than that in LG2 wellblock. These results show that the carbonate reservoir in LG7 wellblock is more open, and is apparently affected by salt dissolved water compared with that in LG2 wellblock. Thus, it is concluded the reservoir connectivity is controlled by the geological setting. Distance to the wedge line of the Carboniferous layer and the thickness of Carboniferous sand-mudstones have negative correlation of openness and connectivity of the reservoir.

**Key words:** formation water; carbonate; Lunnan oilfield; weathering reservoir; connectivity

收稿日期: 2016-06-21 收到 2016-08-31 改回

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05008-03)

第一作者简介: 刘大永(1976-) 男, 副研究员, 研究方向: 油气地球化学. E-mail: liudayong@gig.ac.cn.

深层油气藏中油、气、水的伴生现象非常普遍 (Kharaka and Hanor, 2003),且在油气生产过程中产出的地层水性质不断变化 (Andrew *et al.*, 2000)。地层水特征广泛用于研究其来源及水文地质条件 (Garven, 1995; Kharaka and Hanor, 2003),但其影响因素过多,结果也具有非常大的不确定性 (Birkle *et al.*, 2009)。古大气降水、古海水都有可能是地层水的来源,同时盐岩溶解水对于地层水特征的影响也非常明显 (Knauth, 1988; Pinti *et al.*, 2011)。

氯、溴离子均为地层水中的稳定离子,主要来源于古海水及蒸发岩类 (Stotler *et al.*, 2010),可用于地层水来源及水岩作用的研究。碘离子由于半径较大很难进入矿物,而表现出亲水 (Osborn *et al.*, 2012) 和亲有机质 (Muramatsu *et al.*, 2004),并可能在热成熟过程中从烃源岩中转移到水体 (Fehn, 2012),而成为油气运移的示踪剂。而碘同位素中的  $^{129}\text{I}$  由于半衰期极长 ( $t_{1/2} = 15.7 \text{ Myr}$ ),常用于不同类型流体的定年,如地表水和地下水 (Schwehr *et al.*, 2005),热流体及深部地质流体 (Fehn and Snyder, 2005),盆地卤水 (Osborn *et al.*, 2012)。

利用地层水及组合参数可以指示地层水的成因、演化及水岩作用过程 (Eagel and Blondes, 2014) 及油气的运移方向 (钱一雄等, 2005),其结果与利用原油中一些指标进行的运移研究结果 (Wang *et al.*, 2008) 类似,说明地层水对于油气成藏研究具有重要意义。根据地层水的无机离子性质还可判断塔北奥陶系缝洞油气藏的连通性 (Wang *et al.*, 2008)。

## 1 地质概况

轮南油田位于塔北隆起区,与其南部毗邻的塔河油田属于同一个含油气系统 (梁狄刚, 2008),靠近西北大型天窗区。塔北地区在海西期经历了强烈抬升,造成志留系、泥盆系及上奥陶统的广泛缺失 (吕修祥等, 2007; 严威等, 2011),石炭系直接覆盖在奥陶系潜山风化壳上。同时强烈的构造运动使断至基底的逆冲断裂开始发育,轮台断裂、轮南断裂、桑塔木断裂等都在这一时期发育。经过这次大的构造运动,轮南低凸起基本成形 (张云鹏等, 2011)。经历长期暴露剥蚀形成轮南奥陶系大型潜山岩缝洞型储集体,是轮南海相碳酸盐岩油气勘探主体 (周新源等, 2009; 李阳和范智慧, 2011)。

前人研究表明塔河油田及邻区处于一个水文地质环境相对活跃的地区,地表水渗流是主要的地层水来源,其中的高矿化度主要来源于地层水对含

盐层系的溶解作用及变质作用 (蔡立国等, 2002; 钱一雄等, 2003),且不同储集层中地层水性质差异明显 (钱一雄等, 2003)。

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。自轮西断裂向东南方向鹰山组顶面逐渐变深,与沉积古地貌相似。在横向上,轮古 7、轮古 2 井区储集层物性受古地貌及古岩溶作用的控制,轮古 7 井区鹰山组储集层多以洞穴、孔洞型储集层为主,而东南部的轮古 2 井区鹰山组储集层物性相对偏向于孔洞裂缝型,甚至裂缝型。在轮南-塔河地区,平面上烃类流体具有明显的不均质性 (陈志海等, 2007; 苗忠英等, 2011),如轮古 7 井区原油多为稠油,而轮古 2 井区则以正常油为主。同时,轮南油田开采井普遍受地层水的影响 (蔡立国等, 2002; 钱一雄等, 2003; 赵文革等, 2006; 朱蓉等, 2008)。

本研究所采集的样品来自轮南油田轮古 7、轮古 2 井区开采井。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,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 (图 1、图 2)。奥陶系顶界埋深越大,上覆石炭系的残留厚度越大,且相关性很好 (图 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。同轮古 2 井区相比,轮古 7 井区奥陶系储集层具有以下特征: (1) 上覆石炭系盖层更薄或尖灭; (2) 抬升剥蚀经历的时间更长,表生岩溶作用更为强烈; (3) 距天窗区较近,从而受上部流体的影响更为明显。这些差异在地层水特征上都有响应。

## 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)。

在 2009 年 7 月至 2010 年 9 月之间,在轮古 7、轮古 2 井区共进行了 6 次地层水采样。所采地层水样品均来自鹰山组一段 ( $\text{O}_2\text{y}$ ) 碳酸盐岩风化壳油气藏,并选取一个轮古 7 井区三叠系地层水样品 (LN101C) 进行对比。实验所采用的地层水均来源于自喷试采井,或电泵抽油井,并通过采油曲线及相关记录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。

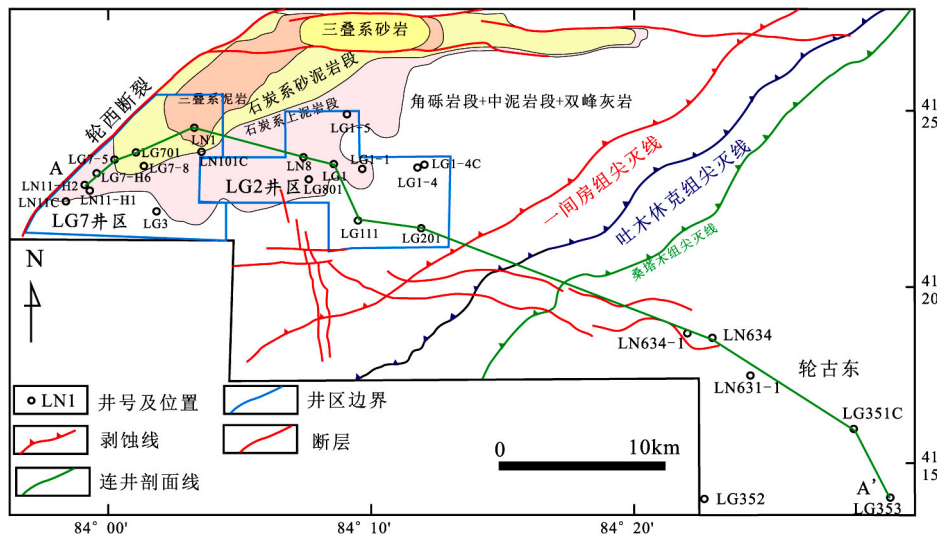


图1 轮南油田奥陶系顶面盖层地质图及采样点分布

Fig.1 Distribution of cap rock on Ordovician reservoir and sampling boreholes in the Lunan Oilfield

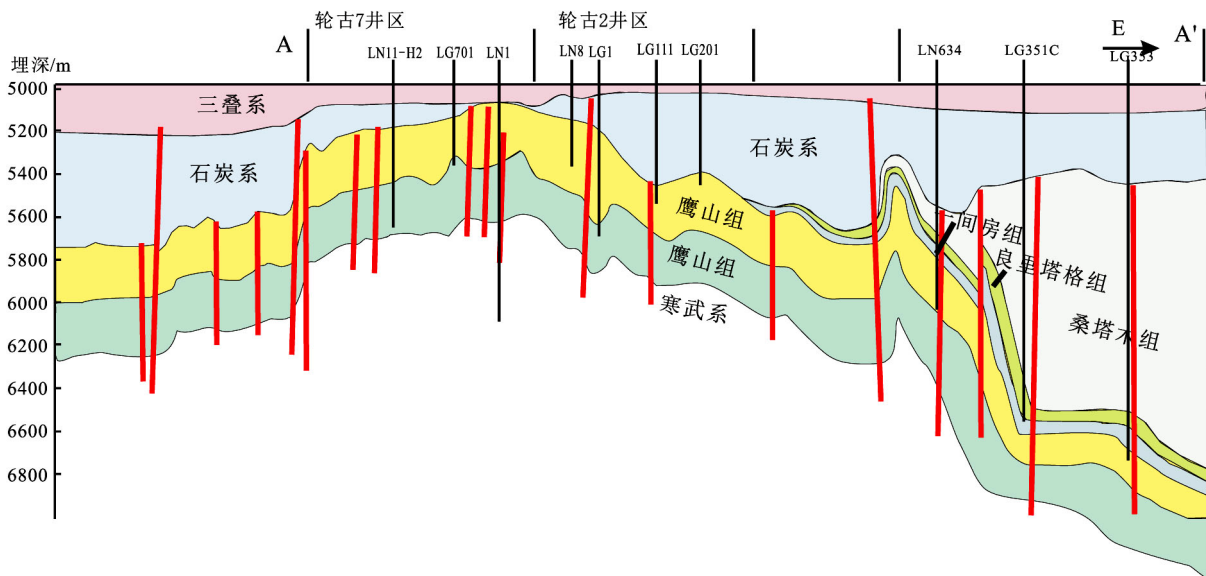


图2 轮南油田研究区地层埋深剖面示意图

Fig.2 Stratigraphic profile of study area in the Lunan Oilfield

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、阳离子浓度检测仪分别为 Dionex ICS900 离子色谱和全直谱 ICP 发射光谱仪。

### 3 实验结果与讨论

研究区地层水均为弱酸性至中性的氯化钙型高矿化度地层水(表 1) 轮古 7、轮古 2 井区样品矿化度分别为  $19.15 \times 10^4 \sim 22.47 \times 10^4 \text{ mg/L}$  和  $15.99 \times 10^4 \sim 21.75 \times 10^4 \text{ mg/L}$ 。自轮古 7 至轮古 2 井区, 自西向东, 地层水特征呈有规律的变化: 随中奥陶统鹰山组油气藏风化作用逐渐变弱, 埋深增加, 上覆

盖层增多变厚, 地层水的矿化度、氯溴比、锶同位素值降低, 而氢、氧同位素比值变重(刘大永等, 2012)。

从地层水的氢、氧同位素比值及碘同位素特征来看, 轮南风化壳油气藏地层水来源的主体为古大气降水, 其年龄约为 10 Ma(Chen *et al.*, 2016)。

#### 3.1 地层水对储集层连通性的响应

氯离子是地层水最主要的无机阴离子, 正常地层水中氯离子浓度与总矿化度呈明显的正相关关系, 是地层水最稳定的离子, 可以代表总矿化度的变化。短期内轮南油田奥陶系地层水氯离子浓度随时间的变化没有规律可循。但轮古 7 井区大多数开采井地层水氯离子浓度随时间的变化规律

表1 研究区鹰山组地层水基础数据

Fig.1 Based data of Ordovician formation water in research area

井区	井号	O <sub>2</sub> y 顶界埋深 /m	pH	无机离子浓度/(mg/L)				
				Cl <sup>-</sup> ×10 <sup>4</sup>	Br <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Sr <sup>2+</sup>
轮古7井区	LN1	5977	6.26	13.5~14.7	170~229	11195~11792	72716~74846	531~546
	LG701	6065	6.32~6.59	13.2~15.1	197~268	11086~11685	71385~77655	513~556
	LG7-8	6019	6.16~6.98	13.5~16.3	158~237	11111~12373	68904~80720	593~645
	LN11-H2	6181	6.15~6.65	13.8~13.9	189~197	11373~11989	74788~75075	552~603
	LG7-H6	6139	6.09~6.10	13.5~14.3	171~229	11245~12003	70541~75669	587~626
	LG7-5	6094	6.14~6.63	12.5~14.0	219~283	11129~11963	70503~76084	483~508
	LN11C	6259	6.26	13.3~14.5	253~299	11824~12016	76767~79467	496~527
轮古2井区	LN8	6117	5.89~5.90	11.8~12.6	306~336	11069~12367	60550~65787	478~532
	LG1-5	6024	5.90~6.42	13.0~14.5	191~256	10694~11437	69619~75838	466~498
	LG1	6135	5.92~6.63	10.2~13.7	274~341	11865~12000	64447~67228	477~541
	LG801	6119	6.39~6.46	11.9~13.4	309~335	11603~12233	61686~67027	525~530
	LG1-4C	6200	6.45~6.72	9.8~11.6	245~326	12864~13721	46988~53995	594~643
	LG111	6376	6.27~6.54	11.7~13.8	272~352	11498~12305	63915~68158	482~534
	LG201	6289	5.85~6.39	11.8~14.8	66~337	8298~12933	55738~79118	359~568

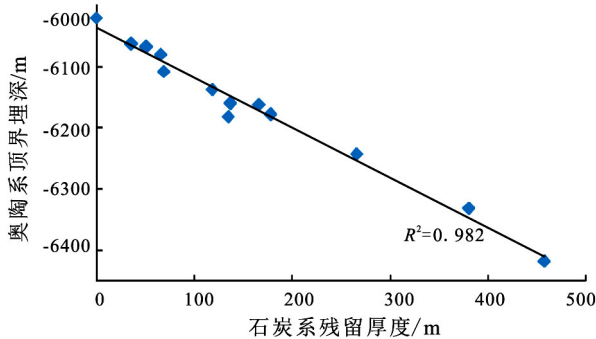


图3 轮南油田轮古7、轮古2井区钻井石炭系残留厚度与奥陶系顶界埋深的关系

Fig.3 Correlation between thickness of Carboniferous strata and buried depth of Ordovician top in LG7 and LG2 wellblocks

非常相似,离散系数较低。轮古2井区各钻井地层水随时间的变化规律总体相似,但相似程度明显不如轮古7井区,且轮古2井区不同钻井地层水氯离

子浓度在同一时间的不均质性更为明显,除第六次采样井过少,地层水氯离子浓度差异较小外,其他采样时间各开采井地层水氯离子浓度的差异均在  $3 \times 10^4$  mg/L 以上(图4)。

离散系数是统计学中常用的参数,其计算公式为:离散系数=(标准偏差/平均值)×100%,其中标准偏差可由EXCEL表格直接给出。地层水的连通性越强,则同一时间采样的地层水混合越均匀,离散系数越小,反之亦然。

轮古7井区地层水在同一时间氯离子浓度变化不大,离散系数相对较小,随时间的变化规律非常相似。可见各钻井之间地层水的连通性较好,不同钻井之间地层水有物质交换并逐渐达到平衡状态。同构造高部位的轮古7井区相比,轮古2井区各钻井地层水氯离子浓度明显更为离散(图5),表明轮古2井区各钻井之间虽然可能连通,但总体上连通

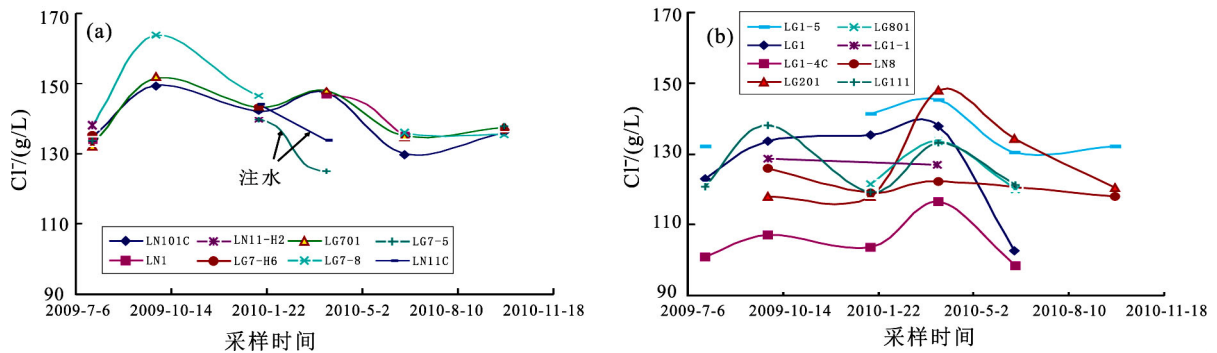


图4 轮古7、轮古2井区6批地层水样品氯离子浓度的变化曲线

Fig.4 Variation of Cl<sup>-</sup> concentrations of formation waters in time scale in LG7 and LG2 wellblocks

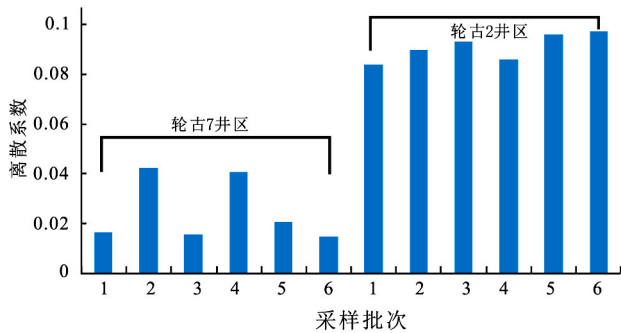


图5 轮古7、轮古2井区6批地层水样品氯离子浓度的离散系数

Fig.5 Coefficient of dispersion of Cl<sup>-</sup> concentrations of 6 batch formation waters in LG7 and LG2 well blocks

性明显不如轮古7井区。

### 3.2 地层水对储集层封闭性的响应

储集层封闭性主要受盖层的影响(吕修祥等, 2014)。轮南1井所处的区域为构造高部位, 鹰山组风化壳储集层与第三系地层直接接触。形成构造天窗, 有利于奥陶系储集层与上部三叠系流体之间的交换, 储集层的封闭性相对较差。自北向南(剖面A-A')随着石炭系地层逐渐增厚, 鹰山组储集层顶部逐渐变深(图2, 表1), 同时距离天窗区逐渐变远, 储集层封闭性逐渐变好。

地层水中氯溴比的差异是由于水岩作用过程中对氯、溴离子的溶解存在差异造成的(Leybourne and Goodfellow, 2007)。从轮南油田地层水的氢氧同位素来看, 地层水的主体为古大气降水(刘大永等 2012), 甚至可能与现今的大气降水有关(蔡立国等 2002)。由此可见, 轮南油田地层水中氯溴比主要体现古大气降水在运移及演化变化过程中对岩石中氯、溴离子溶解的差异性。而下第三系盐岩最有可能是盐岩溶解的来源(Chen *et al.*, 2016)。

除轮古1-5以外, 总体上轮古7井区氯溴比大于轮古2井区, 且两者几乎没有重叠(图6a)。从井位上看, 轮古1-5井位于轮古2井区的北部, 其氯溴比随时间的变化也与轮古7井区各开采井相似, 说明轮古1-5井在相对较高的构造部位, 其储集空间与轮古7井区的地层水体相通。而与轮古2井区其他井不连通。轮古7井区不同时期出水氯溴比值与埋深之间具有粗略的正相关关系, 表明埋深越大, 上覆石炭系砂泥岩层越厚, 受天窗区渗入的盐岩溶解水的影响越小。而轮古2井区地层水氯溴比相对稳定, 不受储集层埋深的影响, 说明轮古2井区并未直接受盐岩溶解水的影响。从轮古7、轮古2井区地层水氯溴比的差异, 也可以看出构造高部位的轮古7井区的储集层开放性强, 受上部天窗区(缺失石炭系砂泥岩盖层)的影响明显, 而轮古2井区的储集层相对更为封闭。

脱硫系数( $SO_4^{2-}/Cl^- * 100$ )反映高价硫含量, 可指示氧化还原环境。前人研究表明不整合面附近及高孔渗带较氧化, 低孔渗带较还原, 因此也可以反映储集层封闭性, 脱硫系数越小, 储集层的封闭性越强。由图6b可见, 同轮古2井区相比, 轮古7井区具有相对较高的脱硫系数, 反映储集层封闭性相对较差。总体来讲, 随奥陶系顶界埋深越深, 石炭系地层厚度越大, 储集层的封闭性越强。这一结论与地质条件相吻合。而在埋深相似条件下, 轮古7井区相对较弱的封闭性则主要是由于轮古7井区钻井距离天窗区比轮古2井区钻井距离更近造成的。

### 3.3 地层水的混合作用

不同时期、不同来源的流体混合作用是地层水演化的普遍规律(Birkle *et al.*, 2009; Varsányi and

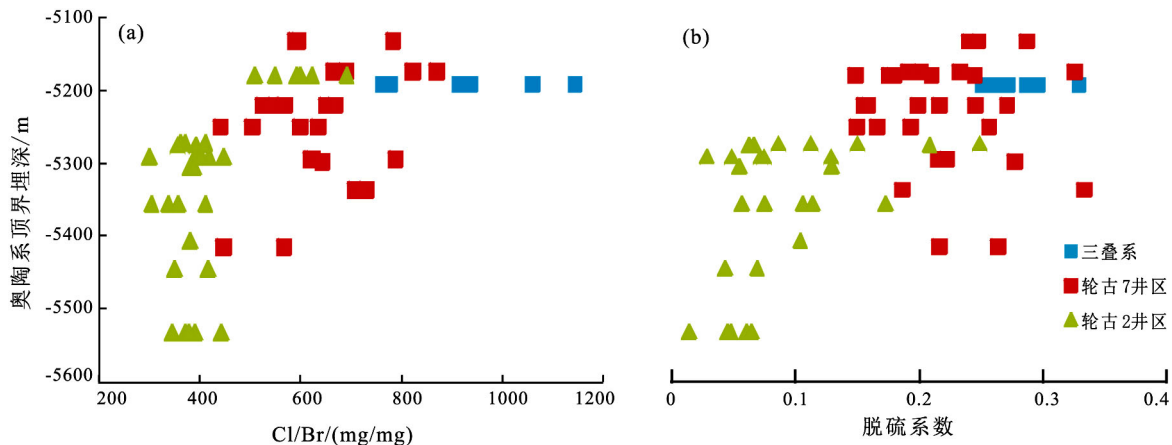


图6 轮南油田轮古7、轮古2井区地层水脱硫系数及氯溴比与奥陶系顶界埋深的关系

Fig.6 Correlation of Cl/Br ratio (a) and coefficient of desulfurization (b) with buried depth of Ordovician top



Kovács, 2009; Chen *et al.*, 2014; Bagheri *et al.*, 2014; Eagle *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2016)。自构造高部位向东南, 奥陶系顶界由浅到深的方向, 古蒸发海水所占的比例逐渐变大, 而古大气降水所占的比例逐渐降低 (Chen *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2016), 可见石炭系砂泥层缺失的天窗是古大气降水为主的流体混合的主要通道。

将 Chen 等 (2016) 年发表的碘同位素数据投射到图版 (Tomaru *et al.*, 2007), 可得出地层水的视年龄。虽然碘同位素视年龄的影响因素较为复杂, 但在相似的地层水系统中, 仍可用于不同钻井地层水的相对期次研究。由图 7 可见, 三叠系地层水视年龄最小, 其次为轮古 7 井区奥陶系地层水, 轮古 2 井区奥陶系地层水的视年龄最大。

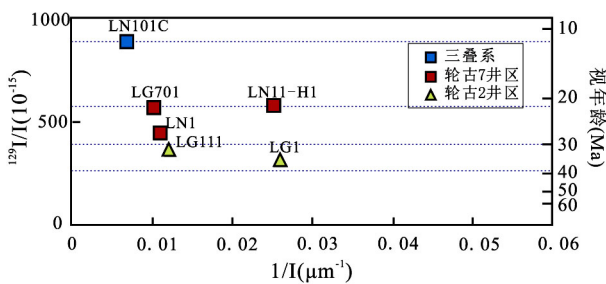


图 7 轮南油田轮古 7、轮古 2 井区地层水的碘同位素及视年龄分布与碘离子浓度的关系

Fig.7 Correlation of  $I^-$  concentration with  $^{129}I/I$  and apparent age of the formation water

地层水的视年龄表明轮南风化壳储集层流体存在不同期次流体的混合, 构造高部位的轮古 7 井区与上覆三叠系地层水的混合比例明显大于埋深更大、上覆石炭系砂泥层更厚的轮古 2 井区。同时, 储集层的开放性越强, 地层水受上覆三叠系地层水的影响越强烈, 地层水的视年龄越小 (图 8)。

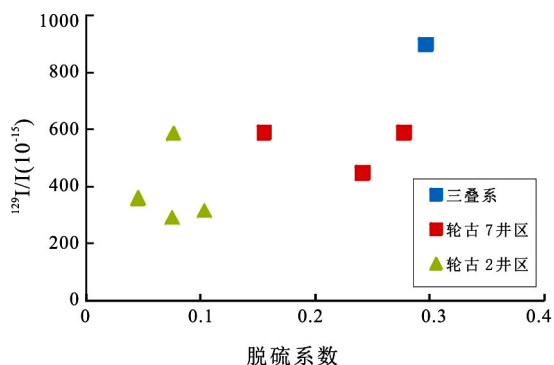


图 8 地层水碘同位素值与脱硫系数之间的关系

Fig.8 Relationship between the  $^{129}I/I$  ratio and coefficient of desulfurization of the formation water

## 4 结论

(1) 构造高部位的轮古 7 井区地层水特征随时间的变化规律表明奥陶系储集层的连通性好, 地层水相对均一; 随埋深增加, 上覆石炭系砂泥层增厚, 轮古 2 井区地层水特征随时间的变化规律明显更为离散, 表明轮古 2 井区奥陶系储集层连通性明显变差, 地层水非均质性更为明显。

(2) 地层水氯溴比及脱硫系数均表明构造高部位的轮古 7 井区奥陶系储集层受石炭系缺失所形成的天窗区的影响明显, 储集层开放性更好, 受上覆三叠系盐岩溶解水的影响明显; 随埋深增加, 储集层开放性逐渐减弱。

(3) 轮南风化壳储集层存在上覆三叠系地层流体与奥陶系储集层流体的混合作用。构造高部位的轮古 7 井区奥陶系储集层中的地层水与上覆三叠系盐岩溶解水的混合作用更为明显, 地层水的视年龄更为年轻。随埋深增加, 二叠系砂泥岩盖层增厚, 开放性减弱, 地层水视年龄更老。

## 参考文献 (References):

Andrew A S, Whitford D J, Berry M D, Giblin A M. 2000. Chemical evolution of formation waters in the Palm Valley gas field, Northern Territory: Impact on field management. SPE: 64476, Brisbane, Australia: SPE

Bagheri R, Nadri A, Raeesi E, Eggenkamp H G M, Kazemi G A, Montaseri A. 2014. Hydrochemical and isotopic ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^2H$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr$ ,  $\delta^{37}Cl$  and  $\delta^{81}Br$ ) evidence for the origin of saline formation water in a gas reservoir. *Chemical Geology*, 384: 62-75

Birkle P, García B M, Padrón C M M. 2009. Origin and evolution of formation water at the Jujo-Tecominoacán oil reservoir, Gulf of Mexico. Part I: Chemical evolution and water-rock interaction. *Applied Geochemistry*, 24(4): 543-554

Chen J, Liu D, Peng P, Yu C, Zhang B, Xiao Z. 2013. The sources and formation processes of brines from the Lunnan Ordovician paleokarst reservoir, Tarim Basin, northwest China. *Geofluids* 13: 381-394

Chen J, Liu D Y, Peng P A, Chen N, Hou X L, Zhang B C, Xiao Z Y. 2016. Iodine-129 chronological study of brines from an Ordovician paleokarst reservoir in the Lunnan oilfield, Tarim Basin. *Applied Geochemistry*, 65: 14-21

Chen L Z, Ma T, Du Y, Yang J, Liu L, Shan H M, Liu C F, Cai H S. 2014. Origin and evolution of formation water in North China Plain based on hydrochemistry and stable isotopes ( $^2H$ ,  $^{18}O$ ,  $^{37}Cl$  and  $^{81}Br$ ). *Journal of Geochemical Exploration*, 145: 250-259

Engle M A, Reyes F R, Varonka M S, Orem W H, Ma L, Ianno A J, Schell T M, Xu P, Carroll K C. 2016. Geochemistry of formation waters from the Wolfcamp and "Cline" shales: Insights into brine origin, reservoir connectivity, and fluid flow in the Permian Basin, USA. *Chemical Geology*, 425: 76-92

- Engle M A , Rowan E L. 2014. Geochemical evolution of produced waters from hydraulic fracturing of the Marcellus Shale , northern Appalachian Basin: A multivariate compositional data analysis approach. *International Journal of Coal Geology* , 126: 45-56
- Fehn U , Snyder G T. 2005. Residence times and source ages of deep crustal fluids: Interpretation of  $^{129}\text{I}$  and  $^{36}\text{Cl}$  results from the KTB-VB drill site , Germany. *Geofluids* , 5( 1) : 42-51
- Fehn U. 2012. Tracing crustal fluids: Applications of natural  $^{129}\text{I}$  and  $^{36}\text{Cl}$ . *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* , 40: 45-67
- Garven G. 1995. Continental-scale groundwater flow and geologic processes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* , 23: 89-117
- Kharaka Y K , Hanor J S. 2003. Deep fluids in the continents: I. Sedimentary basins. In: Drever J I , Holland H D , Turekian K K ( eds ) . *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier , 5: 499-540
- Knauth L P. 1988. Origin and mixing history of brines , of Palo Duro Basin , Texas , U.S.A. *Applied Geochemistry* , 3( 5) : 455-474
- Leybourne M I , Goodfellow W D. 2007. Br/Cl ratios and O , H , C , and B isotopic constraints on the origin of saline waters from eastern Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 71( 9) : 2209-2223
- Muramatsu Y , Yoshida S , Fehn U , Amachi S , Ohmomo Y. 2004. Studies with natural and anthropogenic iodine isotopes: Iodine distribution and cycling in the global environment. *Journal of Environmental Radioactivity* , 74( 1-3) : 221-232
- Osborn S G , McIntosh J C , Hanor J S , Biddulph D. 2012. Iodine- $^{129}\text{I}$  ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  , and trace elemental geochemistry of northern Appalachian Basin brines: Evidence for basin-scale fluid migration and clay mineral diagenesis. *American Journal of Science* , 312( 3) : 263-287
- Pinti D L , Béland-Otis C , Tremblay A , Castro M C , Hall C M , Marcell J S , Lavoie J Y , Lapointe R. 2011. Fossil brines preserved in the St-Lawrence Lowlands , Québec , Canada as revealed by their chemistry and noble gas isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 75 ( 15) : 4228-4243
- Stotler R L , Frapce S K , Shouakar-Stash O. 2010. An isotopic survey of  $\delta^{81}\text{Br}$  and  $\delta^{37}\text{Cl}$  of dissolved halides in the Canadian and Fennoscandian Shields. *Chemical Geology* , 274( 1-2) : 38-55
- Tomaru H , Lu Z L , Snyder G T , Fehn U , Hiruta A , Matsumoto R. 2007. Origin and age of pore waters in an actively venting gas hydrate field near Sado Island , Japan Sea: Interpretation of halogen and  $^{129}\text{I}$  distributions. *Chemical Geology* , 236( 3-4) : 350-366
- Varsányi I , Kovács L Ó. 2009. Origin , chemical and isotopic evolution of formation water in geopressured zones in the Pannonian Basin , Hungary. *Chemical Geology* , 264: 187-196
- Wang T G , He F Q , Wang C J , Zhang W B , Wang J Q. 2008. Oil filling history of the Ordovician oil reservoir in the major part of the Tahe Oilfield , Tarim Basin , NW China. *Organic Geochemistry* , 39( 11) : 1637-1646
- Worden R H , Heasley E C. 2000. Effects of petroleum emplacement on cementation in carbonate reservoirs. *Bulletin de la Société Géologique de France* , 171( 6) : 607-620
- 蔡立国, 钱一雄, 刘光祥, 韩燕英, 张鹏德. 2002. 塔河油田及邻区地层水成因探讨. *石油实验地质* , 24( 1) : 57-60
- 陈志海, 黄广涛, 刘常红, 常铁龙. 2007. 烃类流体分布与缝洞储集层流动单元的划分. *石油学报* , 28( 1) : 92-97
- 李阳, 范智慧. 2011. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律. *石油学报* , 32( 1) : 101-106
- 梁狄刚. 2008. 塔里木盆地轮南-塔河奥陶系油田发现史的回顾与展望. *石油学报* , 29( 1) : 153-158
- 刘大永, 陈键, 彭平安, 肖中尧, 张宝收, 卢玉红, 张海祖, 于赤灵. 2012. 轮南地区碳酸盐岩油气藏类型对地层水特征的控制作用. *石油学报* , 33( 3) : 367-371
- 吕修祥, 周新源, 李建交, 王清华, 杨宁. 2007. 塔里木盆地塔北隆起碳酸盐岩油气成藏特点. *地质学报* , 81( 8) : 1057-1064
- 吕修祥, 屈怡倩, 于红枫, 兰晓东. 2014. 碳酸盐岩盖层封闭性讨论-以塔里木盆地塔中北斜坡奥陶系为例. *石油实验地质* , 36( 5) : 532-538
- 苗忠英, 陈践发, 张晨, 陈鸿雁, 王冠男. 2011. 塔里木盆地轮南低凸起天然气分布规律与成藏期次. *石油学报* , 32( 3) : 404-410
- 钱一雄, 蔡立国, 顾忆. 2003. 塔里木盆地塔河油区油田水元素组成与形成. *石油实验地质* , 25( 6) : 751-757
- 钱一雄, 蔡立国, 顾忆. 2005. 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. *石油实验地质* , 27( 5) : 502-507
- 严威, 王兴志, 张廷山, 丁勇, 刘存革, 吕海涛. 2011. 塔河油田加里东中期第三幕岩溶作用. *石油学报* , 32( 3) : 411-416
- 张云鹏, 任建业, 阳怀忠, 胡德胜, 李朋. 2011. 塔里木盆地轮南低凸起构造特征及演化. *石油与天然气地质* , 32( 3) : 440-447, 460
- 赵文革. 2006. 塔河油田碳酸盐岩缝洞油藏油水关系研究. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学, 55-58
- 周新源, 杨海军, 韩剑发, 王福焕, 韩杰. 2009. 中国海相油气田勘探实例之十二: 塔里木盆地轮南奥陶系油气田的勘探与发现. *海相油气地质* , 2009, 14( 4) : 67-77
- 朱蓉, 楼章华, 鲁新便, 金爱民, 苏丹阳. 2008. 塔河油田缝洞单元地下水化学特征及开发动态. *石油学报* , 29( 4) : 567-572

( 本文责任编辑: 刘莹)

## 专栏作者简介



蔡春芳,1966年生,中国科学院地质与地球物理研究所研究员、博士生导师、长江大学楚天学者特聘教授,2006年获得侯德封奖,2011年获得杰青。在国际著名刊物发表第一作者国际SCI论文20篇,通讯论文8篇。主要从事盆地油、气和水与岩石之间微生物和热化学硫酸盐还原(TSR)等作用,以及高-过成熟烃源岩与油气对比研究。阐明 $\text{CH}_4$ 可以是TSR的主要反应物,定量表征了其碳同位素分馏效应,研发了烃源岩有机硫同位素测试方法,提出了其应用于油源对比的条件,发现了铀矿化硫酸盐还原细菌微化石,建立了微生物与油气同时参与的铀成矿模式。



胡文瑄,1959年生,教授,博士生导师,南京大学能源科学研究院副院长。研究工作涉及矿床学、沉积学、石油地质学和地球化学等多个学科和领域,目前主要工作集中在碳酸盐岩储集层和非常规油气成藏等方面。先后承担和参加40多项科研项目研究工作,包括国家基础研究规划项目、国家科技部重大专项、国家自然科学基金项目,以及有关部委和石油公司的项目。发表论文近二百篇,其中SCI和EI检索论文约70篇,学术专著4部。1997年和2015年分别获得国家教育部科技进步二等奖各一次。此外还兼任教育部地质学类教学指导委员会秘书长,中国地质学会地质教育分会副会长,《石油天然气地质》和《天然气地质科学》等杂志编委。



刘立,1955年生,吉林大学地球科学学院教授、博士生导师,“海洋地质与第四纪地质”编委,“吉林大学学报(地球科学版)”编委和吉林省石油学会第七届理事会理事。主要从事储集层成岩作用与流体-岩石相互作用研究。以主持人身份先后完成、在研国家级、省部级和企业委托的科研项目近30项,其中,国家自然科学基金面上项目及国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目6项,博士学科点基金项目2项。以第一作者或通讯作者身份发表SCI和EI检索论文21篇。



刘大永,1976年生,中国科学院广州地球化学研究所副研究员。负责完成国家科技重大专项有关储层地层水等专题研究,从事过一段时间塔里木盆地塔中、轮南油田水地球化学及相关实验研究,提出地层水特征与碳酸盐岩储集层地质条件之间具有明显的关系。目前主要从事构造应力对页岩气储集空间影响的模拟实验研究。



罗晓容,1959年生,中国科学院地质与地球物理研究所研究员,博士生导师。从事油气地质学应用基础研究,偏重于盆地模拟、盆地异常流体压力、油气成藏动力学等方面的定量研究。第一作者发表相关论文38篇,其中18篇发表于SCI刊物;获国家科技进步奖二等奖2项(2013年度,2016年度,排名第三)。负责完成国家科技重大专项、国家重点基础研究发展计划等项目。任中国石油学会油气地质专业委员会委员、油气运移学组组长、中国地质学会油气地质专业委员会委员、油气运移学组副组长。



吕修祥,1963年生,中国石油大学(北京)教授,博士生导师,长期从事油气藏形成机理与分布规律的教学和研究工作。近十几年来,主要致力于塔里木盆地海相碳酸盐岩油气差异富集机理及控制因素的研究,先后获得4项国家自然科学基金面上项目的资助。获中国青年地质科技银锤奖。第一作者在国内发表论文60篇,其中被SCI收录14篇、EI收录11篇。第一完成人获教育部自然科学二等奖和科技进步二等奖各1项。



寿建峰,1958年生,中国石油杭州地质研究院教授级高级工程师,博士生导师,中国石油碳酸盐岩储层重点实验室主任。主要从事沉积学与油气储集层应用基础研究,建立盆地热-构造-流体驱动的碎屑岩动力成岩作用理论及砂岩孔隙度定量地质预测方法,揭示逼近地层条件的碳酸盐岩水-岩反应新规律,提出多台槽-多级障壁体系碳酸盐岩台地储集层发育模式。第一作者发表论文数十篇、专著一部。



张艳萍,1977年生,中国石油大学(北京)在站博士后。主要从事油气藏形成与分布、地震资料解释的研究工作。近年主要研究了塔中隆起走滑断裂的特征及其对奥陶系碳酸盐岩岩溶储集层、油气差异聚集的控制作用。相关研究成果发表SCI、EI、中文核心期刊论文6篇,获得教育部科技进步奖二等奖1项。