

文章编号:1001 - 6112(2003)06 - 0751 - 07

# 塔里木盆地塔河油区油田水元素组成与形成

钱一雄<sup>1,2,3</sup>, 蔡立国<sup>2</sup>, 顾 忆<sup>2,3</sup>

(1. 石油大学(北京) 资源与环境学院, 北京 102200; 2. 中国石化 勘探开发研究院 无锡实验地质研究所, 江苏 无锡 214151; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院 西部分院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**塔河油区的不同地质时代的油田水成分差异较大、成因复杂。该文根据对塔河油区油田水的常规成分、微量元素和同位素特征统计分析,并将不同地质时代的油田水与原始海水平均含量、氯化钠蒸发阶段中海水的含量相比反映其相对的浓缩程度,同时与淡水平均含量及水岩反应结果来推测淡水淋滤等水岩反应作用程度。研究表明,塔河奥陶系中的油田水中  $Cl^-/Br^-$  为 322 ~ 337, 接近残余海水中卤素元素中溴富集的低限值,同时相对富集卤素元素或挥发份组分和铁族元素中的铬、钒,因而具有典型海相碳酸盐岩中的油田水特征;而石炭系中油田水中  $Cl^-/Br^-$  为 1 399.8,具有贫溴的溶滤水特征;三叠系碎屑岩中油田水中相对富集了亲铜元素和高含量锗。上述油田水中大多均具有“变质水”的  $^{18}O$ 、D 值,三叠系油田水  $^{18}O$  负偏更明显,指示了后期可能受淡水改造;奥陶系油田水主要受原始海水控制,早期存在大气水淋滤-淋溶作用,石炭系油田水经过含膏层过滤反应及大气水的淋滤;而三叠系油田水则经大气淡水的淋滤-水岩等复杂的地质过程而形成。

**关键词:**油田水;元素与同位素地球化学;蒸发;浓缩;淡水淋滤;塔河油田

中图分类号:TE133

文献标识码:A

油田水与石油的产生过程密切相关,水控制了石油母体的沉积环境、烃类的运移,烃类或烃母体在液相中的溶解是首(初)次运移的可能方式<sup>[1,2]</sup>,地层水通过压实作用、深埋成岩作用以及渗滤、细菌作用、水-岩作用等一系列地质作用向油田水转化,在含盐度、压力、温度、pH 值、氧化还原电位、毛细管作用、流体势(动力学)或岩石性质的变化可引起流动烃类的分解或发生成藏作用<sup>[1,2]</sup>。

大量统计资料表明<sup>[2]</sup>,油田水的部分元素通常以下列浓度级存在:百分级的有 Na、Cl;百分级或百万分级为  $Ca$ 、 $SO_4^{2-}$ ;  $> 100 \times 10^{-6}$  有 K、Sr;  $100 \times 10^{-6}$  有 Al、B、Ba、Fe、Li 等;  $100 \times 10^{-9}$  (多数油田水)有 Cr、Cu、Mn、Ni、Sn、Ti、Zr;  $10^{-9}$  (某些油田水)有 Be、Co、Ga、Ge、Pb、V、W、Zn。除了上述常规的无机组分外,还有非烃的有机酸、酯和酮类,水中的饱和烃、芳香烃、脂肪酸和不饱和烃、有机酸的含量均是油气聚集中的重要指标。

塔河油田分为 10 个区(图 1),其中,三叠系凝析油藏分布于 1 和 2 区,石炭系轻质油质油藏主要分布于 1、3 和 6 区,而奥陶系凝析油、轻质油、黑油

和重质油主要分布于 2、3 和 7 区块;奥陶系重稠油主要分布于 4 和 6 区块。奥陶系以裂缝型储集体、孔洞-裂缝型储集体、裂缝-孔洞型储集体复杂孔洞-缝网络古岩溶型储集体和生物礁(滩)型储集体发育为特征。

## 1 塔河油区油田水的元素组成

### 1.1 塔河及邻区油田水常量元素的地球化学特征

本次研究中采集了 11 个油田水,进行了水常规

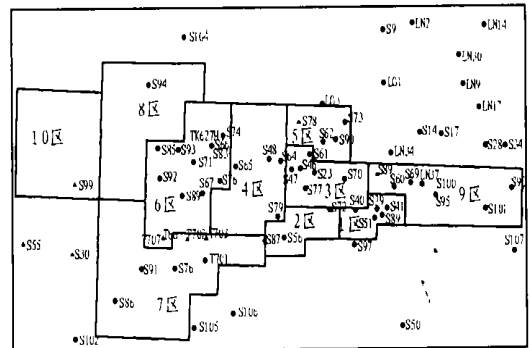


图 1 塔河油区井位位置及分区简图

Fig. 1 The schematic map of Tahe oil field

收稿日期:2003 - 08 - 28;修订日期:2003 - 11 - 06.

基金项目:中国石化集团公司新星石油公司项目(XYK-99-46);中国石化集团公司科技项目(P01025).

作者简介:钱一雄(1962—),男(汉族),江苏苏州人,高级工程师,现为石油大学(北京)在读博士生,主要从事地球化学、盆地分析与油气方面研究工作。

分析、微量元素和  $^{18}\text{O}$ 、D 同位素等分析,分别由国家地质测试中心和地质矿产部水文地质专业实验测试中心完成,同时,综合了蔡立国(2001)<sup>[3]</sup>等所做的 36 个油田水(其中包括三叠系 29 个,石炭系 1 个和奥陶系 6 个样品)资料。首先根据分析结果,进行了样品的初步分析,删去可能遭严重污染的样品(如补井或酸化处理中进入的洗井液等)或不具有代表性的样品。

对塔河及邻区油田水的常规化学分析的数据综合整理(表 1)可见:a)本区的矿化度总体较高,从地层时代来分析;三叠系地层水较石炭系、奥陶系的地层水矿化度高,形成“逆”方向的变化趋势;b)3 个不同时代的地层水样品大多属于  $\text{CaCl}_2$  型,即  $r_{\text{Cl}^-} / r_{\text{Mg}^{2+}} > 1$  (苏林分类);c)从  $\text{Cl}^- / \text{Br}^-$  系数分析,塔河奥陶系中的油田水为 322 ~ 337,相对接近  $\text{Cl}^- / \text{Br}^- < 300$  这一标志是残余海水中卤素元素中溴的相对富集的低限值,而石炭系中的地层水是具有贫溴的溶滤水特征,其值分别为 1 399.8(塔河三区)和 811.7(塔河及邻区平均值),这既代表了不同层位,同时也反映了同一层位不同区域的地层水具有不同沉积与成岩史;d)从  $\text{Br}^- / \text{I}^-$  比值大小变化趋势分析,随着地层水的地层时代变新(O - C - T),溴与碘比值的曲线呈现向上翘的 V 字形,这表明石炭系地层水相对富集碘,这可能与石炭系海陆过渡相

生物体相对活跃所沉积的围岩或粘土中有机质相对富集等介质有关;e)  $\text{Ca}^{2+} / \text{Sr}^{2+}$  比值均低于海水有关的沉积水 ( $\text{Ca}^{2+} / \text{Sr}^{2+} = 33$ ),而三叠系比值为 29.33,相对接近于上述值,但这并不代表它是原始海水形成的,而是经过后期沉积 - 成岩(包括扩散 - 渗流 - 对流等流体运动)复杂地质过程演化而来的。

### 1.2 塔河及邻区三叠系及奥陶系油田水的微量元素特征

按地层水产出的地层时代进行的统计表明,奥陶系与三叠系以及石炭系的地层水的微量元素含量完全不同(表 2)。

从表中可以看出:a)奥陶系地层水中平均微量元素含量高于三叠系地层水的有 F、B、Cs、Cr、Li、V。其中,F 的含量大约高出 3 倍多,B 的含量约为 2 倍,Li 的含量为 2 倍多;b)奥陶系油田水低于三叠系地层水的微量元素有 Ga、Ba、Sr、Cu、Pb、Zn、Mn、Ti、Al。其中,具有显著差异的是镓,约为后者的 1/10,而 Cu、Pb、Zn、Mn 和 Ti 仅为 1/4 至 1/2;c)基本持平的有铍等元素。不同时代的油田水存在上述较大差异的地球化学意义十分明显,奥陶系海相碳酸盐岩中的油田水存在指示海水特征的卤素元素或挥发份组分为富集(B、F),而铁族元素中的铬、钒的相对富集也同样指示海相环境;三叠系碎屑岩中地层水中相对富集了亲铜元素,如铜、铅、锌等,锰的

表 1 塔河油田油田水的常量元素及其比值

Table 1 Composition and ratios of elements concentration of formation water in Taihe oilfield

参数	3,4 区 O	3,4 区 C	1 区 T	2 区 T	奥陶系	石炭系	三叠系
矿化度/( $10^3\text{mg/L}$ )	195.2	204.93	212.94	222.1	116.02	119.8	183.79
密度/( $\text{g/cm}^3$ )	1.126	1.134	1.141	1.147	1.089	1.089	1.13
pH	5.7	5.5	5.7	5.5			
$\text{Cl}^-$ /( $10^3\text{mg/L}$ )	119.6	125	130	136	73.45	71.59	119.59
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$ /( $10^3\text{mg/L}$ )	56.6	66.5	69.6	74	34.71	28.37	60.12
$\text{Ca}^{2+}$ /( $10^3\text{mg/L}$ )	17.3	11.5	10.8	9.1	9.11	6.42	11.21
$\text{Mg}^{2+}$ /( $10^3\text{mg/L}$ )	2 138	511	1 210	2 072	849.6	542.6	1 281.4
$\text{Sr}^{2+}$ /( $10^{-6}$ )					354.78	537.2	338.27
$\text{SO}_4^{2-}$ /( $\text{mg/L}$ )	298	441	312	187	1 624.1	1 895.3	581.6
$\text{HCO}_3^-$ /( $\text{mg/L}$ )	258	152	138	178	370.8	449.4	200
$\text{I}^-$ /( $\text{mg/L}$ )	13.8	4.2	4.5	4.2	8.6	5.8	4.3
$\text{Br}^-$ /( $\text{mg/L}$ )	371	89.3	227	233	217.9	88.2	161.2
$\text{NH}_4^+$ /( $\text{mg/L}$ )	95	49.8	96.6	75	85.4	37.4	81.2
$r_{\text{Na}^+} / r_{\text{Cl}^-}$					0.842 6	0.885 7	0.882 6
$(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / \text{Cl}^-$	0.473 2	0.532 0	0.535 4	0.544 1	0.472 6	0.396 3	0.502 7
$\text{Ca}^{2+} / \text{Sr}^{2+}$					23.58	10.97	29.33
$\text{Br}^- / \text{I}^-$	26.88	21.26	50.44	55.48	25.34	15.21	37.49
$\text{Cl}^- / \text{Br}^-$	322.37	1 399.78	572.69	583.69	337.08	811.68	741.87
$100 r_{\text{SO}_4^{2-}} / r_{\text{Cl}^-}$					6.969	7.736	1.225
备注	以上据周小芬 <sup>[4]</sup> (2001) 综合整理				以上据蔡立国(2001) <sup>[3]</sup> 整理		

表2 塔河及邻区不同层位的油田水的微量元素含量(单位:  $10^{-6}$ )

Table 2 Average concentration of trace elements of formation water in Taihe and its surrounding areas

层位	样品数	Ga	Ba	Sr	Be	Cu	Pb	Zn	Mn	Ni
T	29	0.003	21.67	354.78	0.02	3.11	0.38	3.57	109.84	0.35
C	1	0.050	15.86	537.20	0.03	3.02	0.92	3.69	14.74	0.21
O	15	0.003	14.06	338.27	0.03	1.22	0.07	1.27	31.30	0.11
层位	样品数	V	Cr	Ti	Li	Cs	Cd	Al	B	F
T	29	1.38	0.32	0.88	3.54	1.91	0.028	2.50	14.20	0.83
C	1	1.17	1.52	1.10	3.12		0.104	1.92	6.73	0.05
O	15	2.16	0.57	0.36	8.55	2.77		3.35	27.34	3.39

含量与水型有关,水中离子类型主要为  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的含量较高;而锆的高含量说明三叠系油田水中最有可能是受淡水改造。

### 1.3 塔河及邻区油田水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{18}\text{O}$ 和 D 值

#### 1.3.1 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

这是地层水中一项重要的指标,在石炭系油田水中,地层水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  变化较大,从 0.710 94‰(T406)至 0.710 26‰(S60),可能反映这两口井区的水动力体系相关性较差或成因不同,三叠系的 3 个样品中也有类似现象,从 0.710 71‰(DK4)~0.710 84‰(DK13)~0.711 79‰(S17),S17 井是成岩作用进行中最富含放射性锶和轻氢同位素值的油田水,而 S60 井则是代表淡水淋滤作用较强,但又是相对贫放射性锶元素矿物或围岩下形成的地层水,但氢和氧同位素分析值大致相同。据此判断,上述变化主要可能是不同的围岩矿物或不同的油田水成分造成的。另一方面,赋存于不同时代地层中的地层水(DK4,13,S406)具有相似的锶、氢和氧同位素构成,这表明在分析油田水成因时,不能简单地将地层水按不同地质时代划分对比,而应考虑其水文地质旋回或与储层相关的流动单元等因素。

#### 1.3.2 $^{18}\text{O}$ 和 D

将塔河先后二次采样的三叠系和奥陶系油田水的氢氧同位素平均值进行对比:a)本次研究采样的三叠系油田水( $n=4$ ,DK2、8、13、17)中 D(PDB ‰)平均为 -61.9(-65.0~-57.3), $^{18}\text{O}$ (PDB ‰)平均为 -6.0(-6.7~-5.6),而早期(1999)采样的三叠系油田水( $n=25$ ,A1、An1、AK2-3、DK1-2、4-5、8、10-15、17、S17、28、31、34、51、56、TK201) D(PDB ‰)平均为 -51.0(-61.0~-42.0), $^{18}\text{O}$ (PDB ‰)平均为 -1.4(-1.4~-0.1);b)本次研究采样的奥陶系油田水( $n=6$ ,

TK310、408、601、615、74-75)中 D(PDB ‰)平均为 -58.9(-60.0~-58.0), $^{18}\text{O}$ (PDB ‰)平均为 -5.5(-6.1~-4.7),而早期(1999)采样的奥陶系油田水( $n=5$ ,TK402、405、S64、69、70) D(PDB ‰)平均为 -50.4(-54.0~-48.0), $^{18}\text{O}$ (PDB ‰)平均为 0.04(-6.0~2.7);c)早期仅有 S64、S60 井区与大气降水相一致,其它均属于“变质水”<sup>[51]</sup>,本次样品则均接近“大气水”。从具体井位的油田水的氢氧同位素变化来分析,位于塔河 3 区与 4 区分界之间,或相当于鞍部的 S64 井,其氧的同位素值最低(-6‰),而分别位于四区的岩溶洼地和缓坡的 TK402、TK405,其氢氧同位素也有一些差异,即位于稍高位置上的油田水受淡水淋滤作用要强,出现较低  $^{18}\text{O}$ 、D 值;d)三叠系油田水氢氧同位素平均值均比奥陶系对应值偏低,表明低部油田水更可能受表生(浅层)水的影响;e)无论是三叠系油田水还是奥陶系油田水的先后两期采样,均显示后期的氢氧同位素平均值偏低。一方面表明油田水采样时间先后存在明显的成分差异,早期更能代表井眼及附近的流体构成;另一方面,从先后的采样的油田水同位素变化可推测不同单元流体性质、流体的运动方向等。

## 2 塔河油区油田水形成过程分析

由于沉积物向成岩转变的过程中,一般均经历了压实、脱水和固结 3 个阶段;从孔隙中排出的大量水向岩层侧向或垂向运动并进入较大的孔隙空间而得以贮存,因此,赋存在孔隙中的油田水不一定来源于同时代的沉积物。油田水主要通过物理作用过程(蒸发与浓缩)和物理-化学作用过程(包括阳离子的物理化学吸附,胶体作用)以及以化学热力学及动力学为基础的水-岩反应(岩溶等成岩作用中的元素在液-固分配,元素的带入带出引起的胶结与溶

解作用、白云岩化与去白云岩化、重结晶作用、有机酸作用与次生孔隙发育等)等复杂的地质-地球化学过程而形成<sup>[6-9]</sup>。此次研究塔河及邻区不同时代产层油田水演化主要从蒸发浓缩作用和水-岩作用来分析。在油田水成因分析时,主要考虑以下 3 方面因素:a) 油田水及其水文地质循环水及其组分的主要来源,在此,将大气降水和海水的平均化学组成作为背景值;b) 将油田水所赋存围岩及其岩石类型作为水-岩反应中的固相组分参与;c) 根据目前油田水的主要化学成分及物理特征,利用化学动力学和热力学理论,即水-岩反应中不同元素在不同介质条件下所具有的不同分配系数差异,推断其组分的形成过程,如若油田水中大量富集流体中或围岩中丰度较低的某一元素,且依据配分系数又难于解释其差异时,可认为存在某种其它物源(如深源的热液)或特殊地质作用过程等<sup>[1,6]</sup>。

### 2.1 不同围岩及成岩环境的元素特征

综合研究表明<sup>[2]</sup>:a) 与海水相比,天然水中相对富集亲铜元素,如 Cu、Pb、Zn,铁族元素 Mn,稀有元素 Be 以及造岩元素 Al;b) 两者相差不大的有分散元素 Ga、Cd,亲石元素 Ba,造岩元素 Si;c) 海水中较高地富集造岩元素 Na、K、Ca 和 Mg,卤素元素 I、Cl、Br 和矿化剂元素 F、B、P、S 以及稀有元素 Li 和亲石元素 Sr;d) 海水中稍为富集的元素主要包括铁族元素即 V、Ni、Cr 和 Ti。在主要岩石类型中,页岩中富集大多类微量元素;碳酸盐岩比砂岩中相对富集的主要有 Sr、Ni、B、Ca、Br 以及 Pb、Zn、Ni;砂岩比碳酸盐岩相对富集的有 V、Ti、Al、F。

### 2.2 蒸发-浓缩作用

海水的蒸发作用是决定油田水的最重要作用之一,随水的蒸发,液体不仅可以向下渗流并可在埋藏过程中,经过粒间流体相互作用,逐渐转变为油田水成分。

对海水蒸发作用的详细研究表明<sup>[6-7]</sup>:海水的蒸发指数可简单地用(EI),即卤水中镁(或锂)/海水中的镁(或锂)表示。当 EI = 1.8 时, CaCO<sub>3</sub> 开始沉淀出来; EI = 3.8 时,石膏开始沉淀,其它组分含量增加且 Ca 从溶液中优先分离出来; EI = 10.6,盐岩开始沉淀。

将塔河及邻区的奥陶系、石炭系和三叠系油田水残留的 Br、B、Li、Sr、I 以及 Mg、Ca、Cl、Na + K 等元素含量分别与原始海水平均含量以及蒸发过程中的 NaCl 阶段中所浓缩的海水中的含量相比,可大致反映其各层油田水相对于海水浓缩程度,也可用于间接指示其矿化度的大小。

由表 3 可见:a) 由于溴基本上不参于成岩反应,且其来源及演化相对单一或简单;因此,可用于判断其来源与浓缩程度。与原始海水成分相比,在奥陶系、石炭系和三叠系油田水中,溴的浓缩比分别为 3.35、1.36、2.48,这反映奥陶系中油田水海水的浓缩比显著高于石炭系和三叠系油田水,硼变化趋势类似;b) 在奥陶系油田水中,与溴相类似,钠和钾以及氯离子的浓缩系数均在 3 左右,这表明它们均可指示水型或盐度等参数,也反映具有相同的作用机理或来源与演化史;c) 在奥陶系、石炭系和三叠系油田水中,较高浓缩比的锂(分别为 43、16 和 18),不能仅依靠海水的浓缩作用来达到,还可能与粘土矿

表 3 油田水成分含量(单位:10<sup>-6</sup>)与代表沉积—成岩过程中蒸发与浓缩中海水组分含量比值

Table 3 Composition and variation of formation water in response to evaporation and condensation during depositional and diagenetic process

成分	Li <sup>+</sup>	Br <sup>-</sup>	B	Sr <sup>2+</sup>	I <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
奥陶系(n=15)	8.55	217.9	27.34	217.9	8.6	73 450	34 710		849 630	9 110
石炭系(n=1)	3.12	88.2	6.73	88.2	5.8	71 590	28 370		542 570	6 420
三叠系(n=29)	3.54	161.2	14.20	161.2	4.3	119 590	60 120		1 281 400	11 210
原始海水含量 <sup>[2]</sup>	0.2	65	6	7	0.05	19 000	11 000	350	1 290 000	400
成分	Li/Li(海)	Br/Br(海)	B/B(海)	Sr/Sr(海)	I/I(海)	Cl/Cl(海)	Na/Na(海)	K/K(海)	Mg/Mg(海)	Ca/Ca(海)
奥陶系(n=15)	42.75	3.35	4.56	31.13	172	3.87		3.06	0.66	22.78
石炭系(n=1)	15.6	1.36	1.12	12.6	116	3.77		2.5	0.42	16.05
三叠系(n=29)	17.7	2.48	2.37	23.03	86	6.29		5.3	0.99	28.03
浓缩至 NaCl 阶段含量 <sup>[2]</sup>	11	4 000	300	10	5	275 000	140 000	23 000	74 000 000	100
与浓缩至 NaCl 阶段相比	Li/Li(缩)	Br/Br(缩)	B/B(缩)	Sr/Sr(缩)	I/I(缩)	Cl/Cl(缩)	Na/Na(缩)	K/K(缩)	Mg/Mg(缩)	Ca/Ca(缩)
奥陶系(n=15)	0.78	0.05	0.09	21.79	1.72	0.27	0.21		0.011 5	91.1
石炭系(n=1)	0.28	0.02	0.02	8.82	1.16	0.26	0.17		0.007 3	64.2
三叠系(n=29)	0.32	0.04	0.05	16.12	0.86	0.43	0.37		0.017 3	112.1

物中的溶解作用或流体中富集机制有关;d)在奥陶系油田水中,锶的富集系数高于石炭系和三叠系中对应值,且比钙的富集系数大,这与海水中一般富集规律完全一致,这也进一步证明奥陶系油田水是在原始海水基础上经地质循环作用的产物;e)在奥陶系、石炭系和三叠系油田水中,三叠水中的镁和钙离子含量相对最高,表明其咸度和盐度最高;但不同产层油田水的镁的相对浓集系数均小于或等于 1(三叠系油田水中的浓缩系数接近于 1),与 Sr、B、Li 的变化趋势显然不同,且其浓缩系数均小于钙的对应值,这可能是由于奥陶系与石炭系油田水在演化过程中,与围岩发生白云岩化的结果,而对应于三叠系油田水,未经历白云岩化或发生了去白云岩化,也可能是因其它来源的水的渗混作用所致;f)在所有样品中,Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup>,体现了海水(卤水)或混合水作用的特征;g)与沉积盆地的水演化至氯化钠阶段的对应值相比,上述不同产层油田水,无论是稳定的元素 Br、B、Li,还是相对活泼的 Cl 和 Na、K 均大大低于 1,表明其原始海水不可能蒸发至对应 NaCl 环境的沉积水;h)仅仅通过海水蒸发作用不能说明油田水中一些阴、阳离子的组成(Ca<sup>2+</sup>、Sr<sup>2+</sup>、I<sup>-</sup>等)。

另外,随蒸发作用增强,残余卤水中的 Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> 会增加,陆上蒸发而形成的卤水具有高的对应值,而盐岩的溶解形成低 Br/TDS<sup>[6]</sup>,但是,由于饱含氯化

物的矿物混合物的流体在温度升高时,将优先溶解 K、Mg、Ca 盐,而实际上沉淀出 Na、K、Mg 盐类可提高 Br 的浓度,不均匀溶解也可产生高的 Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> 比。

### 2.3 淡水淋滤等水-岩反应

在分析淡水淋滤或渗入水与围岩相互作用时(溶滤作用),必须区分沉积成因的卤水和经过含盐层、或含膏盐岩层作用的油田水。因后者具有较高的矿化度,具大量的氯化物及较高的硫酸根离子,钠与氯离子比接近 1,氯与溴比大大高于 300,而碘、溴和铵离子浓度较低。当油田水通过膏盐层时,则硫酸钙富集,且以 NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水型和 Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> 远大于 1 为特征。

从表 4 可见:a)从 Cl<sup>-</sup>/Br<sup>-</sup> 比值来分析,石炭系、三叠系的油田水分别为 811.68 和 741.81,与奥陶系的油田水相比,具有相对低的碘和较低的铵,推测可能受含盐岩层的影响,尤其是石炭系油田水中较高的硫酸根离子,可能是与膏盐层作用后的产物;b)油田水与淡水的平均含量相比,从石炭系、三叠系的油田水中的 Li、Br、B、Sr、I 相对浓缩系数均低于奥陶系油田水中的对应值,指示其沉积成因的卤水改造作用较强;c)与奥陶系油田水相比,三叠系中相对高的 Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 含量,这似乎表明它是大气水渗入膏盐层溶滤作用形成的;d)三叠系油田水相对三叠系富集镁离子,与围岩或介

表 4 油田水成分含量(单位:10<sup>-6</sup>)与代表沉积—成岩过程淡水淋滤等水岩反应中组分含量比值

Table 4 The average concentration of composition and the ration with the supposed variation of formation on water in response to water-rock reaction during fresh water weathering process

成分	Li <sup>+</sup>	Br <sup>-</sup>	B	Sr <sup>2+</sup>	I <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
奥陶系(n=15)	8.55	217.9	27.34	217.90	8.60	73 450	34 710		849 630	9 110
石炭系(n=1)	3.12	88.2	6.73	88.20	5.80	71 590	28 370		542 570	6 420
三叠系(n=29)	3.54	161.2	14.20	161.20	4.30	119 590	60 120		1 281 400	11 210
大气淡水中含量 <sup>[2]</sup>	2.00	14.00	15.00	70.00	2.00	7 000	6 000	2 200	4 000	15 000
与淡水含量相比	Li/Li(淡)	Br/Br(淡)	B/B(淡)	Sr/Sr(淡)	I/I(淡)	Cl/Cl(淡)	Na/Na(淡)	K/K(淡)	Mg/Mg(淡)	Ca/Ca(淡)
奥陶系(n=15)	4.28	15.56	1.82	3.11	4.30	10.49	4.23		212.41	0.61
石炭系(n=1)	1.56	6.30	0.45	1.26	2.90	10.23	3.46		135.64	0.43
三叠系(n=29)	1.77	11.51	0.95	2.30	2.15	17.08	7.33		320.35	0.75
碳酸盐岩中含量 <sup>[2]</sup>	3.80	3.72	3.10	190.60	5.80	38.40	118.71	474.48	1 128.00	154 657.14
与碳酸盐岩含量相比	Li/Li(液固)	Br/Br(液固)	B/B(液固)	Sr/Sr(液固)	I/I(液固)	Cl/Cl(液固)	Na/Na(液固)	K/K(液固)	Mg/Mg(液固)	Ca/Ca(液固)
奥陶系(n=15)	2.25	58.58	8.82	1.14	1.48	1 912.76	58.51		753.22	0.059
石炭系(n=1)	0.82	23.71	2.17	0.46	1.00	1 864.32	47.83		481.00	0.042
三叠系(n=29)	0.93	43.33	4.58	0.85	0.74	3 114.32	101.35		1 135.99	0.072
砂岩中平均含量 <sup>[2]</sup>	Li/Li(液固)	Br/Br(液固)	B/B(液固)	Sr/Sr(液固)	I/I(液固)	Cl/Cl(液固)	Na/Na(液固)	K/K(液固)	Mg/Mg(液固)	Ca/Ca(液固)
与砂岩中含量相比	15.20	32.00		0.08	0.40	200.00		6 000		15 640
奥陶系(n=15)	0.56	6.81		2 723.75	21.50	367.25	5.79			0.582 5
石炭系(n=1)	0.21	2.76		1 102.50	14.50	357.95	4.73			0.410 5
三叠系(n=29)	0.23	5.04		2 015.00	10.75	597.95	10.02			0.716 8

质中较低的  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  有关,而  $\text{Ca}^{2+}$  离子的相对富集,可能与相对浅的埋藏深度、较低的温度所对应,这与储层中较少的方解石胶结物、白云岩化较弱或无的成岩现象相吻合;e) 假若考虑目前油田水与围岩呈热力学平衡,在上述的油田水与碳酸盐岩水-岩体系中,Br、B、Cl、K+Na、Mg 配分系数均低于 1,即倾向于富集于溶液中(油田水),比如在奥陶系油田水中,除 Ca 外,其它元素(Li、I 等)均相对富集于油田水中,而在三叠系油田水中,Cl、Na、K、Mg 则相对更为富集;f) 在油田水-碎屑岩(砂岩)体系中,Br、Sr、I、Cl、Na、K 的配分系数均低于 1,较富集于溶液中,因此,若以  $D=1$ ,以淋滤作用为主的水-岩反应可解释油田水中的部分元素含量,其中包括 Sr、I、Li(油田水-碳酸盐岩)和 Ca、Li(油田水-砂岩),无法解释的是 Cl、Na、K、Mg(碳酸盐岩-油田水)和 Sr、I、Cl、Br、K(油田水-砂岩)。

因此,塔河油田水可能经过复杂的地质演化史,主要包括蒸发浓缩、淋滤-淋溶以及阳离子交换与粘土吸附等复杂的地质-地球化学作用过程。奥陶系油田水主要受原始海水控制,早期存在大气水淋滤-淋溶作用;石炭系油田水经过含膏层过滤反应及大气水淋滤;三叠系则是大气淡水淋滤-水岩反应等复杂的地质作用过程而形成。

### 3 结论与讨论

塔河油区的油田水的矿化度总体较高,三叠系最高,形成“逆”方向的变化趋势,多属于  $\text{CaCl}_2$  型,石炭系中的油田水是具有贫溴的溶滤水特征,相对富集碘,这可能与石炭系海陆过渡相生物体相对活跃所沉积的围岩或粘土中有机质相对富集等介质有关。

不同产层的油田水微量成分差异较大,奥陶系油田水中 F、B、Cs、Cr、Li、V、Cr 平均含量高于三叠系油田水对应值,而 Ga、Ba、Sr、Cu、Pb、Zn、Mn、Ti、Al 则低于三叠系油田水的对应值;奥陶系海相碳酸盐岩中的油田水富集卤素元素或挥发份组分和铁族元素中的铬、钒;三叠系碎屑岩中油田水相对富集了亲铜元素和高含量锆,后者说明三叠系油田水中有可能受淡水的改造。

在石炭系油田水中,较大差异的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  揭示了不同水动力体系相关性较差或成因不同,根据

部分井区赋存于不同时代地层中的油田水具有相似的锶、氢和氧同位素构成,不能简单地将油田水按层位划分对比,而应考虑其水文地质旋回或与储层相关的流动单元等因素。氧同位素负偏值大的三叠系油田水可能受表生(浅层)水的影响,早期采样更能代表井眼及附近的流体的构成,而后期的采样的油田水同位素变化可推测不同单元流体性质、流体的运动方向等。

奥陶系油田水主要受原始海水控制,早期存在大气水淋滤-淋溶作用;而石炭系油田水经过含膏层过滤反应及大气水淋滤;三叠系则经大气淡水淋滤-水岩反应等复杂的地质作用过程而形成。

应该指出,根据油田水组成及与原始海水或淡水的成分的简单对比虽然大大简化了油田水演化史分析,但对揭示其复杂的物理-化学作用过程(包括细菌在内的生物化学作用等)仍然是杯水车薪,对地质-地球化学作用过程的深入研究依赖于水-岩实验结果及计算机模拟等综合手段与方法<sup>[6-9]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] Parnell J. Geofluids: origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins[M]. The Geological Society, London, Special Publication No. 78. 1994. 360 - 372.
- [2] 柯林斯 A. G(林文庄,王秉忱译). 油田水地球化学[M]. 北京:石油工业出版社, 1984.
- [3] 蔡立国,钱一雄,刘光祥,等. 塔河油田及邻区地层水成因探讨[J]. 石油实验地质, 2002, 24(1): 57 - 60.
- [4] 周晓芬. 塔里木盆地北部油田水特征离子及意义[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 372 - 374.
- [5] Lecuyer C, Allemand P. Modelling of oxygen isotope evolution of seawater: implications for the climate interpretation of the of marine sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63: 351 - 361.
- [6] Horita J, Zimmermann H, Holland H D. Chemical evolution of seawater during the pHanerozoic: Implication from the record of marine evaporites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(21): 3733 - 3756.
- [7] 文冬光,沈照理,钟佐焱. 水-岩相互作用的地球化学模拟理论及应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 1998, 1 - 55.
- [8] R H Worden, M L Coleman, J M Matray. Basin scale evolution of formation waters: diagenetic and formation water study of the Triassic Chaunoy Formation, Paris Basin[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(17): 2513 - 2528.
- [9] Palaandri J A, Reed M H, Reconstruction of in situ composition of sedimentary formation waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(11): 1741 - 1767.

## THE OILFIELD WATER IN TAHE AREA, TARIM BASIN —CONSTRAINTS FROM ITS ELEMENT COMPOSITION

QIAN Yi-xiong<sup>1,2,3</sup>, CAI Li-guo<sup>2</sup>, GU Yi<sup>2</sup>

(1. Department of Resource and Environment, University of Petroleum, Beijing 102200, China; 2. Research Institute Of Experimental Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China; 3. Western Subdivision of Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract :** The wide range variation of composition of (oilfield) formation water in the different geological era are likely to represent the complex origin and evolution history of fluid. It is thus important to understand how to describing the evolution of water. In order to demonstrate the relative richness of elements in the evaporation and condensation of seawaters and effect on composition variation of oilfield water in water-rock reaction, we have studied the evolution of water in terms of oxygen, carbon isotopes and a great number of chemical components of oilfield water, combined with the comparison among the components of oilfield water or the average seawater composition or brine water undergone the evaporation and condensation of seawater or meteoric water in the dilution and weathering process. The results suggest the marine carbonate rocks-related origin of Ordovician formation water with good proxy indicator of ratio of  $Cl^-/Br^-$  (322 ~ 337), which approach to the minimum richness content in a preserved Phanerozoic marine seawater, as well as high richness of halogen elements of Br, Cl and I, volatility elements of F, Cl and B, and Iron cluster elements of V, Cr, and so on, the Carboniferous formation water is characteristic of dilution and filtration process with ratio of  $Cl^-/Br^-$  as high as 1 399.8, while the Triassic formation water contains relatively high contents of Pro-copper cluster elements and germanium (Ge), indicating a significant input of meteoric water during the late diagenetic process. the isotope records of  $^{18}O$ , D and  $^{87}Sr/^{86}Sr$  of formation water shows a significant feature of "metamorphic water" with a much negative shift of  $^{18}O$  of Triassic formation water. In conclusion, the composition of Ordovician formation water have been mainly controlled by evaporation and condensation of ancient seawater, undergone a series of dilution input and mixing of meteoric water in the early period of Hercynian, the Carboniferous formation water have been related to dilution and filtration as well as chemical interaction between the meteoric water and gypsum-bearing or halite rocks; while the Triassic formation water maybe derived from mixing and rock interaction with meteoric water.

**Key words :** oilfield (formation) water; element geochemistry and oxygen, carbon and strontium isotopes; evaporation and condensation; dilution and filtration; Tahe oilfield; Tarim Basin