

文章编号: 1001-6112(2007)03-0292-06

# 塔河油田奥陶系油田水同位素特征及地质意义

贾存善<sup>1,2</sup>, 马旭杰<sup>3</sup>, 饶丹<sup>2</sup>, 高仁祥<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151; 3. 中国石化 西北分公司 勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**塔河油田奥陶系地层水的  $\delta D$ (SMOW) 分布于  $-44.7\% \sim -61.0\%$ , 表明为古大气降水和原生沉积水的混合水, 并以古大气水为主。根据油田水的高压物性参数、 $HCO_3^-$  离子碳同位素、锶同位素  $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值等的横向变化规律, 大致判断出塔里木盆地阿克库勒凸起古大气水的优势流动方向为从阿克库勒凸起的东北构造高地向鼻凸倾伏的西南方向流动, 并且在此流动过程中由构造轴部向两翼分流, 通过对断裂、裂隙等薄弱带的不断溶蚀扩大, 最终形成塔河油田奥陶系复杂的碳酸盐岩岩溶缝洞系统, 为油气聚集成藏提供了有效的储集空间。因此, 古大气水流动的方向对岩溶缝洞系统的分布以及缝洞单元的连通性具有重要的控制作用。

**关键词:**岩溶缝洞系统; 同位素; 油田水; 奥陶系; 塔河油田; 塔里木盆地

中图分类号: TE133

文献标识码: A

## ISOTOPIC CHARACTERISTICS OF OIL FIELD WATERS FROM ORDOVICIAN OIL ACCUMULATIONS IN TAHE OILFIELD AND ITS GEOLOGICAL SIGNIFICANCES

Jia Cunshan<sup>1,2</sup>, Ma Xujie<sup>3</sup>, Rao Dan<sup>2</sup>, Gao Renxiang<sup>2</sup>

(1. College of Resource & Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China; 3. Exploration & Production Research Institute of Northwest Branch Company, SINOPEC, Urumqi, Xingjiang 830011, China)

**Abstract:** Hydrogen isotope values ( $\delta D$ ) of oil field waters from the Ordovician oil accumulations in Tahe oilfield cover  $-44.7\% \sim -61.0\%$  (SMOW), from which one can conclude that the oilfield waters are mostly paleo-atmospheric waters mixed with original sediment seawater. Based on the transverse change trends of the parameters in these oilfield waters, such as high pressure physical parameter, carbon isotope of  $HCO_3^-$  electronegative ion and  $^{87}Sr/^{86}Sr$  ratio of strontium isotope, one can roughly deduce that the predominant flow direction of paleo-atmospheric water is from the northeastern tectonic high position to the southwestern plunge end of the Arkekule nose salient. In this process, the current flowed from axis to two wings of the tectonic, which would cut through weakness belt of faults or cracks and enlarge the space by carbonates corrosion, finally formed complicated karst fracture-cavity system of the Ordovician carbonates in Tahe Oilfield. Therefore, the flow direction of paleo-atmospheric water controlled the distribution of fracture-cavity system and connectivity of fracture-cavity cells.

**Key words:** Karst fracture-cavity system; isotope; oil field water; the Ordovician; Tahe Oilfield; the Tarim Basin

过去曾认为油田水代表原生水或原始捕集的沉积水。Clayton<sup>[1]</sup>得到的同位素证据表明, 大气降水形成的地下水是北美大陆地区油田水的主要组成部分, 油田水往往含盐度较高, 可能是由于溶解蒸发岩或页岩中粘土矿物薄膜过滤作用造成的。油田水的  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  同位素值及含盐度变化范围

很大, 但在给定的盆地内具有特征的同位素值, 基本上沿着一条具有正斜率的曲线变化, 相交于大气降水线, 交点代表大气降水的同位素组成, 大多数情况下与现代气候条件下当地的大气降水同位素值一致。

Carother<sup>[2]</sup>研究表明,  $80 \sim 120^\circ C$  时油田水中

收稿日期: 2007-02-12; 修订日期: 2007-04-10。

作者简介: 贾存善(1973-), 男(汉族), 青海人, 博士生, 工程师, 主要从事油气有机地球化学及成藏研究。

羧酸阴离子含量可达  $5 \times 10^{-9}$ , 含量峰值出现在  $80 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。水溶性羧酸阴离子是原岩热催化反应的产物, 并在  $120 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$  时受热脱羧作用而分解, 即  $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ 。甲烷生成带脱羧作用分解形成的  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  随成岩作用(温度)强度而增加, 其  $\delta^{13}\text{C}$  值由  $-50\%$  增加到  $-10\%$  左右<sup>[3]</sup>, 可见水中  $\text{HCO}_3^-$  主要取决于成岩过程中产生的  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  则反映了碳酸盐岩形成时的温度<sup>[4]</sup>。

由于锶元素在海水中的残留时间(约 1 Ma)长于海水的混合时间(约 1 000 a), 因而 Petorman<sup>[5]</sup> 认为在一定的地质历史时期海洋中锶同位素是稳定的, 海水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值只是地质时间的函数。在显生代锶同位素  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  变化明显, 在中生代明显变低, 而石炭纪时  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  却是显生代最高的, 达 0.709, 接近于现代海水中的锶同位素  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值。对于蒸发岩的锶同位素组成, 目前了解甚少, 但硬石膏等富钙蒸发岩的锶同位素组成可能非常类似于海水中沉淀的锶同位素组成。

从中可见, 油田水同位素的组成特征对于研究其成因以及与油气的关系有重要的地质意义。大量的油田水数据表明, 塔河油田奥陶系油田水是以  $\text{CaCl}_2$  型为主的高矿化度水(矿化度均大于  $100 \text{ g/L}$ ), 微量元素以锶、钡、锰、硼含量为主<sup>[6~8]</sup>。本次研究主要采集了塔河油田主体区即塔河 4, 6, 7 区奥陶系油藏 24 件油田水样品, 为了保证样品的纯度, 在采集过程中排除了有泥浆、压井液、酸压液、洗井液以及修井液等影响的井, 并以稳定生产一定阶段的井中油田水样品为主。

## 1 地质背景

塔河油田构造上位于塔里木盆地北部沙雅隆起阿克库勒凸起南部斜坡区<sup>[9]</sup>。阿克库勒凸起是以寒武—奥陶系海相碳酸盐岩为主体的大型继承性古凸起, 由于经历了加里东中、晚期至海西期的抬升隆起, 奥陶系地层遭受长期风化剥蚀, 在阿克库勒凸起的大部分地区, 中、上奥陶统已被剥蚀殆尽<sup>[10]</sup>, 只保留了下统鹰山组( $\text{O}_1\text{--}2\text{y}$ )和中统一间房组( $\text{O}_2\text{y}_j$ )的碳酸盐岩, 而中、上统仅在凸起的围斜才有所分布。

阿克库勒凸起塔河油田奥陶系油藏的储集空间以碳酸盐岩溶蚀孔、洞、缝为主。奥陶系碳酸盐岩缝洞系统的发育主要受控于古岩溶作用, 而古岩溶作用则明显受阿克库勒凸起上多期构造运动控制, 尤其是海西早、晚 2 期构造运动对塔河奥陶系

岩溶的发育起到了主要作用, 为油气在岩溶作用形成的缝洞系统中聚集成藏提供了有效的储集空间。

塔河奥陶系古岩溶的发育与大气水的平面及纵向流动关系密切。奥陶系碳酸盐岩在暴露地表过程中受到地表水的淋滤和溶蚀, 水通过构造运动形成的断裂和裂缝渗入或流入地表, 以淋滤、溶蚀等方式在碳酸盐岩中形成复杂的、非均质的孔、洞、缝系统, 因此碳酸盐岩缝洞系统的发育方向和规模与水流方向不无关系, 古大气水的水流方向影响着古岩溶发育的方向。

## 2 实验方法

油田水的氢、氧同位素以相对 V-SMOW 的千分差来表示, 实验室内部标准反复分析产生的偏差  $\delta\text{D}$  为  $\pm 1.5\%$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  为  $\pm 0.08\%$ 。分析方法采用改进的 Friedman 金属锌( $450 \text{ }^\circ\text{C}$ )还原法和 Epstein 的二氧化碳—水平衡法<sup>[11]</sup>。碳酸盐中的碳、氧同位素用 PDB 为标准, 采用改进的 McCrea 磷酸法进行测定<sup>[12]</sup>, 分析精度  $\delta^{18}\text{O}$  为  $\pm 0.03\%$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  为  $\pm 0.02\%$ 。分析仪器为 MAT-251 气体同位素质谱仪, 用双进样双束比较测量测定了油田水的氢、氧及  $\text{HCO}_3^-$  碳、氧同位素比值。

南京大学重点实验室完成了油田水锶同位素样品的测试分析。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  采用浓缩、离子交换分离后, 转化成硝酸盐或氯化物, 采用 MAT-262 固体同位素质谱测定  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值, 精度为  $\pm 0.000\ 02$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 油田水成因

一般来说, 标准海水的  $\delta\text{D}$  和  $\delta\text{O}$  均为  $0\%$ , 而大气降水受高度、纬度、温度和离海岸线远近影响而变化, 一般小于  $-60\%$  (SMOW)。大气降水形成地下水后, 可能会与粘土矿物发生氢同位素交换而有所升高, 但变化不是很大。由于海水和大气降水的  $\delta\text{D}$  差别较大, 因此  $\delta\text{D}$  是判断地层水成因来源的重要依据。地层水中氧同位素与围岩会发生同位素交换而变化较大<sup>[13]</sup>, 所以不能反映原始地层水的氧同位素特征。塔河奥陶系地层水  $\delta\text{D}$  值分布于  $-44.7\% \sim -61\%$  (表 1), 平均值为  $-51.4\%$ , 分布于大气水线<sup>[14]</sup> 的右侧(图 1), 偏离标准海水值, 为沉积盆地地层水的特点, 并受古大气降水的影响严重, 而使地层水的氢同位素降低, 表现为大气水与原生沉积水的混合。蔡立国等<sup>[8, 15]</sup> 根据塔河油田及邻区地层水  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  同位素特征, 认为塔河油田及邻区奥陶系、石炭系、三叠系中地层水的主要

表 1 塔河油田奥陶系油田水碳、氧、氢和锶同位素数据

Table 1 Isotopic values of hydrogen ,oxygen,carbon and strontium in Ordovician oilfield waters in Tahe Oilfield

区块	井号	$\delta D_{H_2O}$ ,	$\delta^{18}O_{H_2O}$ ,	$\delta^{13}C_{HCO_3^-}$ ,	$\delta^{18}O_{HCO_3^-}$ ,	$^{87}Sr/^{86}Sr$
		‰,(SMOW)	‰,(SMOW)	‰,(PDB)	‰,(PDB)	
塔河 4 区	TK409	-49.3	2.07	-8.48	-9.96	0.710 076
	TK449H	-53.2	2.27	-8.23	-7.85	0.710 002
	T402	-51.5	2.84	-7.98	-7.51	0.709 989
	TK404	-58.4	1.20	-9.84	-9.10	0.710 281
	TK424CH	-52.3	1.08	-5.97	-6.13	0.709 981
	TK408	-45.9	2.67	-10.60	-10.93	0.709 884
	TK426	-42.3	3.09	-6.63	-6.25	0.710 022
	TK428	-54.6	1.28	-6.41	-6.48	0.709 977
	TK413	-50.6	1.97	-6.33	-5.65	0.709 895
	TK407	-51.5	2.04	-11.57	-11.55	0.709 776
	TK458H	-58.6	1.03	-8.36	-7.91	0.709 871
	TK416	-60.8	-2.13	-10.93	-11.55	0.710 429
	TK434	-45.4	2.48	-12.29	-13.87	0.710 265
	TK460	-44.7	1.92	-8.18	-8.74	0.710 184
	TK417	-53.4	1.64	-13.80	-15.33	0.709 879
塔河 6 区	S74	-44.7	2.17	-12.17	-13.17	0.710 374
	TK621	-50.1	0.75	-8.58	-10.02	0.710 182
	TK650	-44.2	2.34	-8.88	-10.83	0.709 960
	TK648	-45.0	1.74	-11.22	-11.44	0.710 216
	TK604	-61.3	1.27	-11.57	-11.89	0.710 396
	TK606	-59.3	0.84	-13.82	-13.56	0.709 971
塔河 7 区	TK712	-50.5	0.47	-9.80	-11.79	0.709 988
	T7-633	-53.2	0.88	-11.25	-12.24	0.710 063
	T7-615	-60.3	-3.09	-12.82	-13.92	0.709 871

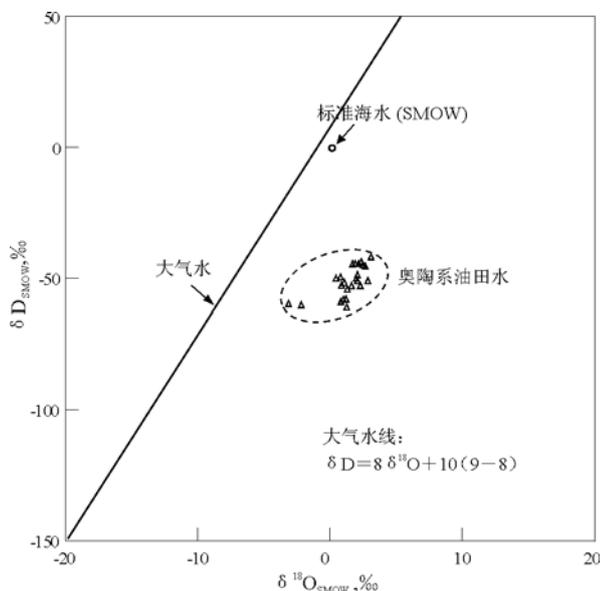


图 1 塔河油田 4,6,7 区奥陶系地层水氢、氧同位素组成

Fig.1 Isotopic compositions of hydrogen and oxygen in the Ordovician oilfield waters in block 4,6 and 7 of Tahe Oilfield

成因是地表水渗流,溶解地层中的 NaCl,导致地层水发生混合,形成高矿化度的卤水。因此,塔河油田奥陶系地层水以古大气水为主,混合了原始沉积

海水。塔河油田奥陶系地层水主要来源于大气降水,这与塔河油田岩溶作用机制吻合,岩溶作用主要是淡水溶蚀,混合溶蚀范围很小或发育程度很弱。

### 3.2 古大气水的流动方向

根据塔河奥陶系地层水高压物性参数、 $HCO_3^-$  碳同位素以及锶同位素值的平面变化规律(表 1),可以大致判断出阿克库勒凸起古大气水的优势流动方向为从东北构造高地向鼻凸倾伏的西南方向流动,并且在流动过程中从构造轴部向两翼分流。

#### 3.2.1 地层水物性变化

塔河油田 3,4,6 区奥陶系油藏地层水高压物性参数(表 2)表明,从塔河油田 3 区→4 区→6 区地层水密度有不断增加的趋势,指示了大气水从阿克库勒凸起轴部东北高部位向西南流动的方向,这是由于大气水在流动过程中部分溶解了石炭统巴楚组泥岩中的膏盐,使地层水的密度和粘度沿鼻凸倾伏方向不断增大。

#### 3.2.2 地层水中碳酸氢根碳同位素变化

奥陶系地层水中的  $HCO_3^-$  主要由  $CO_2$  溶于水而形成。水中  $CO_2$  主要来源有 2 个:一是大气中的  $CO_2$ ;二是油气在演化过程中脱羧作用形成的

表 2 塔河油田 3,4,6 开发区块油田水高压物性参数

Table 2 High pressure physical parameters of oil field waters from production block 3,4 and 6 in Tahe Oilfield

区块	体积系数	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	溶解气水比	压缩系数/ (10 <sup>-4</sup> MPa <sup>-1</sup> )	地下粘度/ (mPa · s)	地面密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )
3	1.034 9	1.088 2	0.226 5	1.438 2	0.597 0	1.126 2
4	1.034 9	1.101 6	0.228 7	1.438 4	0.594 9	1.140 0
6	1.034 3	1.116 7	0.220 5	1.401 6	0.604 1	1.155 0

CO<sub>2</sub>。大气中 CO<sub>2</sub> 的 δ<sup>13</sup>C 值在 -7‰ 左右, δ<sup>18</sup>O 值在 -7‰ 左右。从塔河油田奥陶系地层水 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 碳同位素的值(表 1)及其在平面上的变化(图 2)特点来看, S48 井处于相对构造高部位, 附近多口井产出地层水的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 碳同位素值在 -6.33‰ ~ -6.63‰ 之间, 与大气中 CO<sub>2</sub> 的碳同位素值相近, 说明大气水首先从构造高部位开始渗入, 在重力驱动下向阿克库勒凸起两翼及倾伏端流动, 在此过程中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的 δ<sup>13</sup>C 逐渐变为 -8‰, 往凸起两翼及倾伏方向 δ<sup>13</sup>C 值达到 -13‰ ~ -14‰, 这是由于运移中的油气脱羧作用形成的 CO<sub>2</sub> 混入的结果。同时这也是原油受浮力及压力驱动, 由满加尔坳陷生油中心沿 T<sub>7</sub><sup>4</sup> 不整合面向北运移至阿克库勒凸起成藏的证据。

从 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 碳同位素值在平面上变化来看, 在 T<sub>7</sub><sup>4</sup> 不整合面地形较陡部位, 地层水 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的 δ<sup>13</sup>C 值变化较快, 往往形成“V”字形的突进形态, 如 S48 井附近就是这样情形, 这说明大气水从高部位向低部位流动过程受古地貌控制明显。

3.2.3 地层水中的锶同位素变化

对于显生宙以来古海洋锶同位素的变化, 许多学者进行了探索<sup>[5,16~18]</sup>。从地质时期古海洋锶同位素变化规律来看, 奥陶—志留纪、泥盆纪 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 同位素比值比较稳定, 均为 0.708, 到石炭纪时升高达到 0.709, 至中生代为最低降到只有 0.706~0.707, 以后又慢慢升高, 到近代回升至 0.709~0.710。

塔河油田奥陶系油田水的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 同位素比值总体很高(表 1), 达到 0.709 776~0.711 429, 平

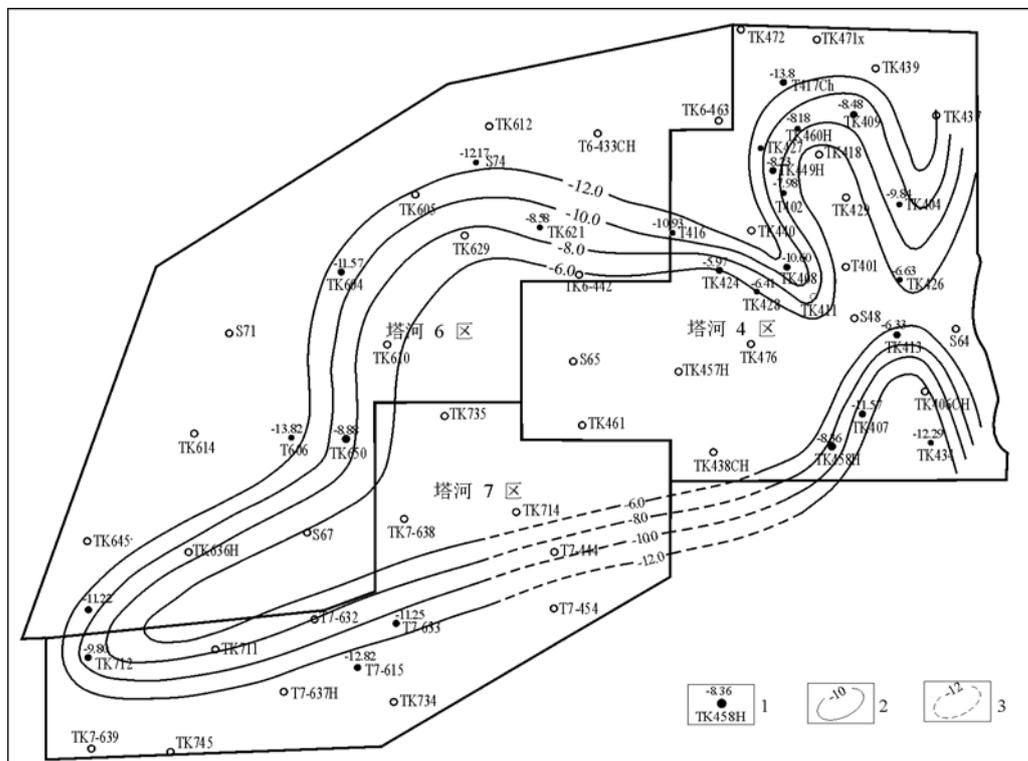


图 2 塔河油田 4,6,7 区奥陶系油田水 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 碳同位素等值线

1. 实测点; 2. 实测等值线(PDB), ‰; 3. 推测等值线(PDB), ‰

Fig. 2 Contour map of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ion carbon isotope of the Ordovician oilfield waters from production block 4,6 and 7 in Tahe Oilfield

均值为 0.710 144。在显生宙只有石炭纪和现代海洋<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 同位素才达到如此高的比值。黄思静<sup>[19]</sup>研究塔中奥陶纪锶同位素变化时认为,盆地抬升过程中,近地表大气淡水作用带来的富放射性成因锶,可以影响海相碳酸盐的锶同位素组成,使<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值显著升高。本次研究认为造成这种现象的原因可能有 2 种:一是上覆的石炭系沉积之后,在成岩过程中由于压实作用而使巴楚组泥岩开始大量排水,部分泥岩排出水进入奥陶系岩溶缝洞系统,而石炭系本身<sup>87</sup>Sr 含量相对较高,因此可能使奥陶系地层水中的<sup>87</sup>Sr 含量增加;二是由于海西晚期该地区抬升剥蚀,大气降水再次通过大的构造断裂和裂缝从凸起轴部注入,然后在重力驱动下由阿克库勒鼻凸起轴部(高部位)向低部位(两翼和倾伏方向)流动,其流动的方向受 T<sub>7</sub><sup>4</sup> 不整合面起伏形态的控制。在大气水流动过程中溶解了巴楚组泥岩中部分含钾的粘土矿物,处于同一族的铷(Rb)往往与钾伴生,<sup>87</sup>Rb 衰变为放射性成因<sup>87</sup>Sr 而进入水中,使<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值逐渐由阿克库勒凸起轴部的 0.709 781 增高至两翼的 0.710 063 直至 0.710 429 以上(图3),这表明<sup>87</sup>Sr 就是从构造轴部

向构造两翼及倾伏方向等低部位富集,造成现今地层水的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值向两翼和倾伏方向不断增大,从而指示了古大气水渗入后的流动方向。

古大气水在流动过程中受到 T<sub>7</sub><sup>4</sup> 构造面地形的陡缓、高差、裂缝发育方向等因素的共同控制。在 T<sub>7</sub><sup>4</sup> 不整合面地形相对较陡的部位,大气水流速度明显比较宽缓部位快,因此<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 同位素比值变化也相应较快,如在 S48 井区东南和东北部形成“V”字形突进。

### 3.3 古大气水流动方向对大型缝洞系统发育方向的控制作用

塔河油田奥陶系碳酸盐岩有效储集空间主要是岩溶形成的缝、洞系统。由于岩溶作用发生的首要条件是水和碳酸盐岩接触,若要大气水对碳酸盐岩的溶蚀和溶解加快,就要增加大气水与碳酸盐岩的接触面积,进而增大大气水及地下水的溶蚀范围。构造断裂和裂缝能够改善碳酸盐岩的渗透性能,成为岩溶作用的先期通道,而断裂和裂缝发育的规模与走向将直接控制岩溶发育的方向和缝洞系统发育的规模。

海西早期和晚期构造运动是本区断裂和裂缝

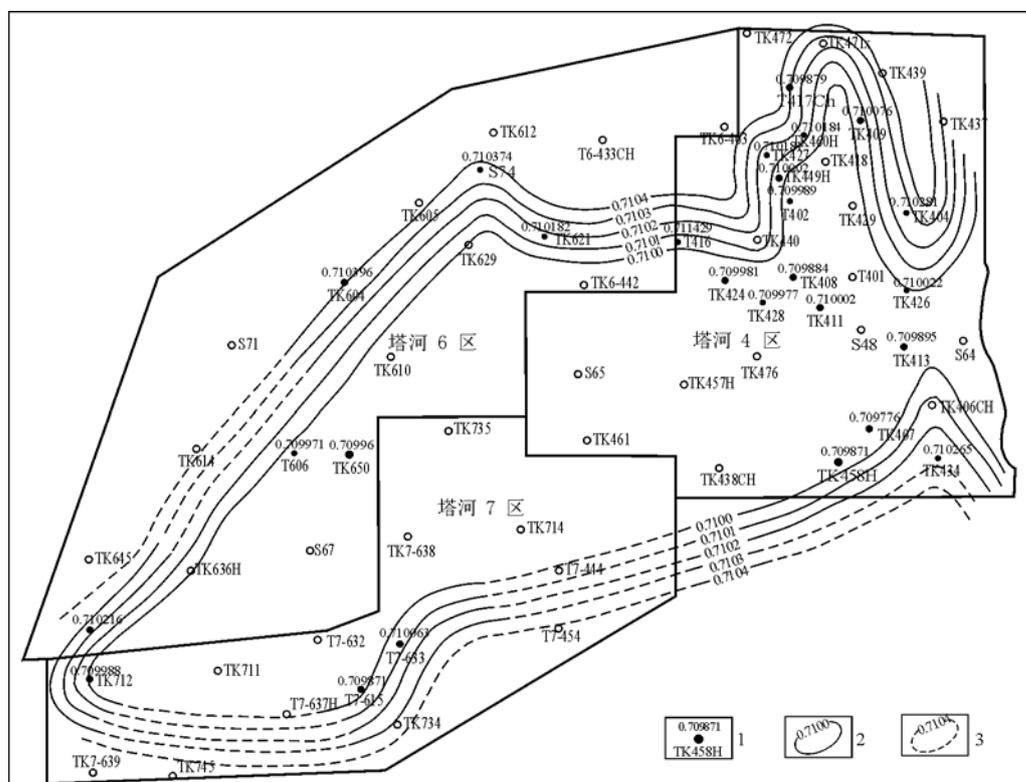


图 3 塔河油田 4,6,7 区奥陶系油田水锶同位素<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 等值线

1. 实测点;2. 实测等值线;3. 推测等值线

Fig. 3 Contour map of strontium isotopic <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratio of the Ordovician oilified waters from production block 4,6 and 7 in Tahe Oilfield

的主要发育期,构造运动的主应力方向由海西早期的NW—SE向转为海西晚期的S—N向。塔河油田4区主要发育NEE—SWW向和近S—N向2组断裂。NEE—SWW向断裂和裂缝形成于海西早期,S—N向断裂和裂缝与海西晚期主应力方向平行;塔河油田6,7区断裂和裂缝以NE和NNE向为主,可能发育于加里东—海西早期,与6区古构造走向一致;奥陶系顶面现今构造总体亦为NNE走向。

海西早期是塔河油田奥陶系岩溶主要发育期,大气水从凸起轴部高部位通过这些断裂和裂缝注入地下,在重力驱动下将会沿这些断裂和裂缝的走向向两翼方向流动,因此大型溶蚀缝洞系统的发育方向大致与构造轴相斜交。一般来说,与构造主应力方向大致平行的纵张断裂和裂缝更容易发生岩溶作用。如海西早期和晚期与构造主应力相对应发育了NW向和S—N向纵张裂缝。由于断裂和裂缝走向的复杂性及岩性变化,岩溶作用形成的缝洞系统是复杂多变的,且非均质性很强,对于缝洞系统的预测很难。在大气水流动方向以及断裂和裂缝走向对岩溶发育方向的控制下,塔河奥陶系碳酸盐岩岩溶缝洞系统的发育方向与大气水流动方向以及断裂和裂缝的走向大致平行。海西晚期发育的EW向断裂沟通了NW向、NE向发育的岩溶缝洞系统,大大改善了大型缝洞系统之间的连通性。通过生产井压力资料及井间干扰分析划分的开发缝洞系统分析证实,大型的缝洞系统以NE—NNE向、SN向及NW向为主<sup>[20]</sup>。

#### 4 结论

塔河油田奥陶系古大气水除了从凸起轴部向两翼流动之外,还从凸起东北的高部位向西南倾伏端方向流动,因此构造高部位以及两翼是岩溶缝洞系统发育的部位,而随大气水流动距离的增加,发育大型岩溶缝洞系统的几率有所减小。因此研究古大气水的运动方向对于预测塔河油田岩溶缝洞系统的分布以及缝洞单元的连通性具有重要的意义。

#### 参考文献:

- 1 Clayton R N. The origin of saline formation waters, I. Isotopic composition [J]. *Geophys*, 1966, 71: 3869~3882
- 2 Carother W W. Aliphatic acid anions in oil-field water-implications for origin of natural gas [J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62: 2441~2453
- 3 Nriagu J O. *Environmental biogeochemistry* [M]. MI: Ann Arbor Science Publishers, 1976. 1~3
- 4 Hadson J D. Stable isotopes and limestone lithification [J]. *Geology Soc*, 1977, 133: 637
- 5 Peterman Z E. Isotopic composition in sea water throughout Phanerozoic time [J]. *Geochim et Comochim Acta*, 1970, 34: 105~120
- 6 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
- 7 刘建伟, 张哨楠. 塔河油田奥陶系油田水特征离子及意义 [J]. *地质找矿论丛*, 2005, 20(1): 40~46
- 8 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
- 9 俞仁连. 塔里木盆地塔河油田加里东期古岩溶特征及其意义 [J]. *石油实验地质*, 2005, 27(5): 468~472
- 10 高 波, 刘文汇, 范 明等. 塔河油田成藏期次的地球化学示踪研究 [J]. *石油实验地质*, 2006, 28(3): 276~280
- 11 Swart P K, Price R. Origin of salinity variations in Florida Bay [J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47: 1234~1241
- 12 Swartet P K, Leder J J, Szmant A M, et al. The origin of variations in the isotopic record of Scleractonian corals: II Carbon [J]. *Geochim et Comochim Acta*, 1996, 60: 2871~2885
- 13 王大锐. 油气稳定同位素地球化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. 18~112
- 14 Ciaig H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, 133: 1702
- 15 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和油气地质意义 [J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(4): 503~506
- 16 Burke W H, Denison R E, Hetherington E A, et al. Variation of seawater  $\{^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}\}$  throughout Phanerozoic time [J]. *Geology*, 1982, 10(10): 516~519
- 17 Veizer J, Buhl D, Diener A, et al. Strontium isotope stratigraphy: Potential resolution and event correlation [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1997, 132: 65~77
- 18 Roger J, Barnaly, Gregg C, et al. Strontium isotopic signatures of oil-field waters: Applications for reservoir characterization [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 80(12): 1677~1704
- 19 黄思静, 刘树根, 李国蓉等. 奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(1): 1~7
- 20 王晓东, 陈 凌. 塔河油田下奥陶统溶洞分布规律初步探讨 [J]. *西部探矿工程*, 2003, 20(1): 70~71