

DOI:10.12119/j.yhj.201901008

# 柴达木盆地西部狮子沟背斜构造区深部卤水 水化学特征及演化分析

刘溪溪<sup>1,2,3</sup>, 岳鑫<sup>1,2,3</sup>, 袁文虎<sup>1,2,3</sup>, 范增林<sup>1,2,3</sup>, 于小亮<sup>4</sup>, 董启伟<sup>1,2,3</sup>, 陈金牛<sup>1,2,3</sup>

(1. 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海 格尔木 816000; 2. 青海省柴达木综合地质矿产  
勘查院青藏高原盐湖及盐类矿产资源成矿规律及预测实验室, 青海 格尔木 816000;  
3. 青海省盐湖地质调查院, 青海 格尔木 816000; 4. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810000)

**摘要:**近年来的调查工作发现,柴达木盆地西部的一些背斜构造区油田卤水具有储量大、品位高的特点,表现出良好的开发和利用前景。在狮子沟背斜构造区深部有含卤层甚至盐岩层的发现。以狮子沟背斜构造区深层卤水为研究对象,采样测试其离子含量,进而分析卤水的离子比例系数,对其水化学特征、物质来源、演化过程进行分析,研究认为深部卤水主要是盐岩溶解作用形成的,其中不乏有沉积卤水的加入;其演化主要受控于蒸发和溶解的双重作用,同时白云岩化、酸性斜长石的溶解以及中酸性热液的淋滤作用也可能对该区卤水有某种程度的影响。

**关键词:**狮子沟;背斜构造;深部卤水;水化学;演化分析

中图分类号:P641.3

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2019)01-0073-09

自 1998 年狮子沟油田进入全面开发阶段以来,对其背斜构造已进行过较全面、透彻的研究,内容涵盖地层、构造、演化、成藏机制等方面。李丽认为该区新生代地层主要经历了三期构造变形<sup>[1]</sup>;张世铭认为该区下干柴沟组地层中广泛存在的盐类矿物溶蚀孔、白云石晶间孔及裂缝是石油的储集空间<sup>[2]</sup>。易定红的研究表明,该地区分布广泛、厚度稳定的下干柴沟组上段膏盐岩沉积是在干旱炎热气候条件和深水背景下湖水蒸发浓缩结晶而成的<sup>[3]</sup>。隋立伟建立了狮子沟—英东构造带的断裂控藏模式<sup>[4]</sup>。张津宁认为膏盐岩的发育对异常高压的分布具有明显的控制作用<sup>[5]</sup>。近年来,中国科学院青海盐湖研究所对柴西油田卤水开展系统研究,通过水化学特征和同位素分析研究油田卤水的分异演化。针对狮子沟背斜构造区内与油气共生的新近系深部卤水的研究程度尚浅,故而以“青海省茫崖狮子沟地区深层卤水钾盐资源调查评价项目”为依托,对狮子沟背斜构造区深部卤水的水化学特征及演化过程进行调查。

## 1 地质背景

调查研究区位于柴西隆起的茫崖凹陷内,英雄岭冲断褶皱带的西南面,属于狮子沟—英东构造带,北侧毗邻咸水泉—油泉子构造带,南侧为尕斯断陷,西北部受控于阿尔金断裂。因柴达木盆地历经多次构造运动,受阿尔金断裂左旋走滑和盆地晚期近南北向挤压应力场的共同影响,露头表现为北西—北西西向平缓的反“S”型背斜构造<sup>[6-8]</sup>(图 1),其东西长约 24 km,南北宽约 7~8 km,构造面积约 164 km<sup>2</sup>。背斜构造南翼地层倾角 60°~80°或近于直立,在狮子沟和游园沟发生倒转,地层倾角约 78°~85°,北翼地层倾角一般为 5°~15°,较为平缓,中间一带地层倾角 2°左右。

区内总体地形:西南部较为平缓,东北部起伏较大,冲沟发育;山前地表多为第四系戈壁砾石所覆盖。山区背斜构造上出露新近系的碎屑岩类沉积物,主要有全新统冲积洪积物(Q<sub>h</sub><sup>al+pl</sup>)、上更新

收稿日期:2018-04-19;修回日期:2018-06-25

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(12120113078700)

作者简介:刘溪溪(1988-),女,硕士,主要从事盐湖勘查工作。Email:1169056287@qq.com。

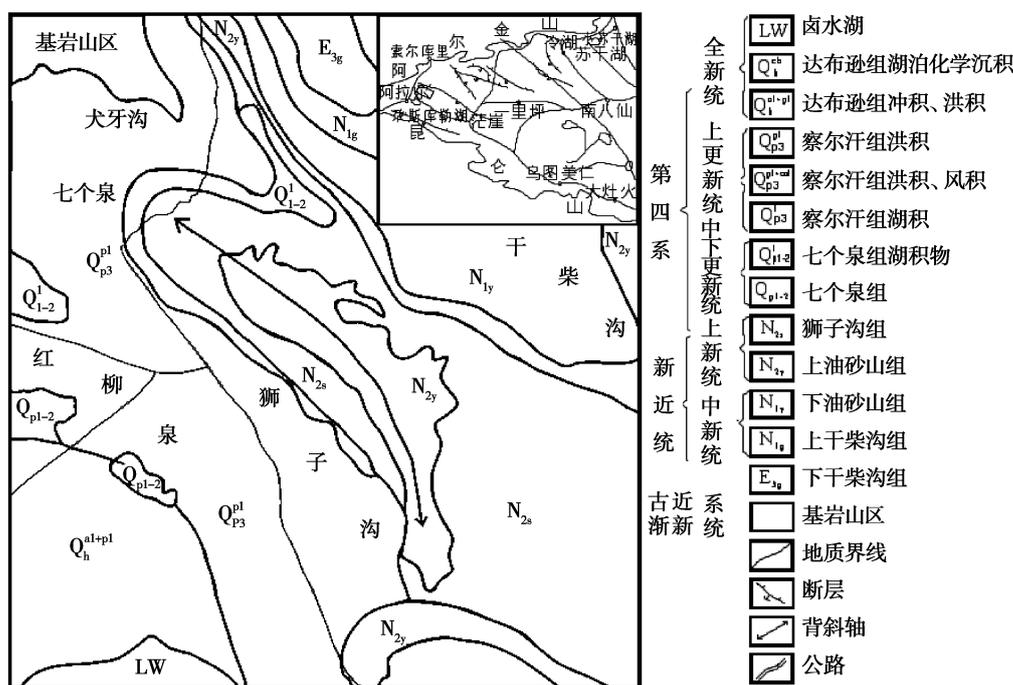


图 1 狮子沟背斜构造区地质图

Fig. 1 Geologic map of Shizigou anticline structure area

统洪积物( $Q_{p3}^{pl}$ )、中下更新统湖积物( $Q_{p1-2}^l$ )、上新统狮子沟组( $N_{2s}$ )和上油砂山组( $N_{2y}$ )、中新统下油砂山组( $N_{1y}$ )和上干柴沟组( $N_{1g}$ )以及古近纪渐新统下干柴沟组( $E_{3g}$ )。通过钻孔及青海油田油井资料,个别油井揭露古近系路乐河组( $E_{1+2}$ ) (表 1)。狮子沟背斜地区地面出露最老地层为上油砂山组( $N_{2y}$ )。

狮子沟背斜构造区发育北西向、北北西向断层。利用英西三维地震资料可初步确认该区断裂构造及特征,受狮子沟、狮南断层控制,英西中深部有多个背斜、断背斜、断鼻等构造圈闭发育;在浅部,主要发育狮子沟滑脱断层,其中在断层上盘又有狮子沟和花土沟构造发育,下盘有花西背斜构造发育,中部则以低幅度鞍部连接。

## 2 水化学特征分析

### 2.1 样品采集与分析

卤水样品的分析测试项目有密度、溶解性总固体(矿化度)、 $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$ 、 $CO_3^{2-}$ 、 $Br^-$ 、 $Li^+$ 、 $B_2O_3$ 、 $I^-$ 、pH 值等。

常量离子  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$  等,用常规重量法(误差 0% ~ 5%)和滴定法(误差 0.2% ~ 0.3%)测定;微量离子  $Li^+$ 、 $I^-$ 、 $Br^-$  等的含量采用原子吸收光谱法(误差小于 2%)进行测定;吸光度法(误差小于 1%)则用于测定  $B^{3+}$  离子含量。青海省柴达木综合地质矿产勘查院岩矿测试中心完成所有测试,实验数据结果如表 2。

### 2.2 卤水水化学特征

#### 1) 常量离子水化学特征及水化学类型

此次卤水均取自狮子沟背斜构造区新近系地层,取样深度均大于 2 800 m。矿化度分布范围大,狮中 203 井的矿化度最低,为 62.36 g/L,狮中 207 井最高,为 344.3 g/L,但是 77% 的深层卤水矿化度大于 260 g/L。常量离子中  $Na^+$  含量 23.09 ~ 128.00 g/L,  $Cl^-$  含量 35.59 ~ 187.8 g/L,两者占绝对优势。 $Ca^{2+}$  含量普遍较高,介于 0.1 ~ 0.562 g/L 之间,  $SO_4^{2-}$  含量也较高, 1.755 ~ 27.61 g/L。  $K^+$  含量 0.867 ~ 8.801 g/L,除狮新 28、狮 203 井外,均达到工业品位。水化学类型按照苏林分类可划分为重碳酸钠型、硫酸钠型和氯化

表 1 狮子沟背斜构造地区地层表

Table 1 Stratigraphic chart of Shizigou anticline structure area

界	系	统	组	代号	柱状图	地表岩性
新生界	第四系	全新统	达布逊组	$Q_h^{al+pl}$		灰色砂砾石、粉砂、砂质粘土
		上更新统	察尔汗组	$Q_{p3}^{pl}$		砾石粗砂
		中下更新统	七个泉组	$Q_{p1-2}^i$		棕灰、黄灰色泥岩、砂质泥岩为主,夹粗碎屑岩、石膏薄层及少量泥灰岩、鲕状灰岩
	新近系	上新统	狮子沟组	$N_{2s}$		棕、浅棕色砂质岩、泥质岩和砾岩互层,部分地区发育碳酸盐岩
			上油砂山组	$N_{2y}$		灰色砂质岩和棕色、灰色泥质岩为主,部分地区发育碳酸盐岩,局部可见灰黄色砾岩
		中新统	下油砂山组	$N_{1y}$		绿灰、黄绿、黑灰、棕灰色砾状砂岩、砂岩、砂质泥岩互层
			上干柴沟组	$N_{1g}$		以灰色、红色砂质岩和深灰色、红色泥质岩为主,部分地区发育碳酸盐岩
		渐新统	下干柴沟组	$E_3$		灰色砾岩、砂质岩和灰—深灰色泥质岩为主,部分地区发育碳酸盐岩、石盐、硬石膏、钙芒硝以及天青石等盐类物质
		始新统	路乐河组	$E_{1+2}$		深灰色钙质泥岩、砂质泥岩、泥岩与灰色、棕红色砂、砾岩互层

化钙型三种类型(表 2),在图 2 上表现出明显的碳酸盐—硫酸盐—氯化物环状分布规律,具有典型的盐类沉积矿床分异规律。

### 2) 微量离子水化学特征

卤水样品中  $B_2O_3$  611.2 ~ 5 770 mg/L, 占绝对优势,  $I^-$  离子含量 6.1 ~ 29.5 mg/L,  $Sr^{2+}$  含量 7.491 ~ 106 mg/L,  $Rb^+$  分布范围 6.25 ~ 49.85 mg/L, 大部分达到综合利用工业品位。

### 3) 离子比例系数

$rNa/rCl$  系数常用来表示钠盐的富集程度,也可以大致判断卤水的来源。海水的  $rNa/rCl$  比值为 0.85, 当海水不断蒸发浓缩, TDS 达到 250 ~ 275 g/L 时, 石盐开始沉积, 卤水中  $rNa/rCl$  降至 0.82; 随着石盐的不断析出,  $rNa/rCl$  不断降低。因此, 常将该系数值小于 0.85 的卤水作为具有古海水特征的沉积卤水<sup>[9]</sup>。本次调查所取水样的  $rNa/rCl$  值均明显大于 0.85, 大部分在 1 左右, 为明显的溶盐卤水特征。

表 2 狮子沟背斜地区深层卤水多项分析离子含量

Table 2 Chemical compositions of deep brine in Shizigou anticline structure area

油井编号	水化学 类型	密度	TDS	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Li <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>
		$/(g \cdot cm^{-3})$	$/(g \cdot L^{-1})$	$/(g \cdot L^{-1})$	$/(g \cdot L^{-1})$	$/(g \cdot L^{-1})$	$/(g \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(g \cdot L^{-1})$
狮 23-1	重碳酸钠型	1.11	156.20	1.90	57.18	0.25	0.10	4.69	67.56
狮新 28	氯化钙型	1.08	134.30	1.49	49.91	0.68	0.29	27.18	78.53
狮 24	氯化钙型	1.20	329.60	6.90	120.50	0.16	0.02	1.24	186.80
狮 20	氯化钙型	1.20	329.10	4.66	121.10	0.50	0.09	77.50	181.70
狮 40	氯化钙型	1.20	312.70	5.43	114.60	0.26	0.02	3.02	177.00
狮 32-3	硫酸钠型	1.17	269.50	5.01	98.43	0.46	0.12	88.50	151.60
狮 1-2	硫酸钠型	1.19	300.50	3.77	112.90	0.30	0.02	3.45	167.00
狮 42	硫酸钠型	1.20	326.10	7.25	121.10	0.19	0.12	1.15	181.10
狮 47	硫酸钠型	1.17	271.90	7.02	98.35	0.56	0.09	88.00	145.90
狮 203	硫酸钠型	1.04	62.36	0.87	23.09	0.24	0.11	11.91	35.59
狮 207	硫酸钠型	1.22	344.30	5.33	128.00	0.10	0.02	0.22	183.30
狮 43	硫酸钠型	1.22	336.10	8.08	122.80	0.22	0.06	1.53	187.80
狮 201	氯化钙型	1.20	308.70	7.34	113.00	0.25	0.13	0.65	174.70
油井编号	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	I <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Cs <sup>+</sup>	Rb <sup>+</sup>
	$/(g \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(g \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(mg \cdot L^{-1})$
狮 23-1	27.61	32.39	0.00	1.48	9.80	76.00	10.86	<0.104	8.96
狮新 28	1.94	58.39	0.00	1.24	14.10	28.00	106.00	7.07	7.93
狮 24	11.18	0.00	0.00	4.01	16.70	29.60	11.38	7.51	34.78
狮 20	15.80	0.00	0.00	5.03	21.10	30.40	20.28	31.16	29.20
狮 40	11.06	0.00	0.00	0.44	29.30	38.53	17.88	51.50	37.23
狮 32-3	7.82	0.00	0.00	5.77	28.20	36.73	29.64	43.32	39.29
狮 1-2	12.95	131.50	0.00	3.30	18.50	29.33	7.49	12.54	20.68
狮 42	11.93	214.50	0.00	4.33	18.80	2.74	12.85	8.64	40.09
狮 47	15.51	0.00	0.00	4.34	29.50	0.10	32.51	58.22	49.85
狮 203	1.76	137.60	0.00	0.61	6.10	13.50	39.59	6.11	6.25
狮 207	23.73	286.10	0.00	3.67	17.70	14.42	10.40	9.10	28.26
狮 43	12.15	934.20	0.00	4.48	22.25	31.67	11.94	11.81	43.53
狮 201	8.56	198.70	0.00	4.46	17.75	0.30	8.25	10.01	38.09

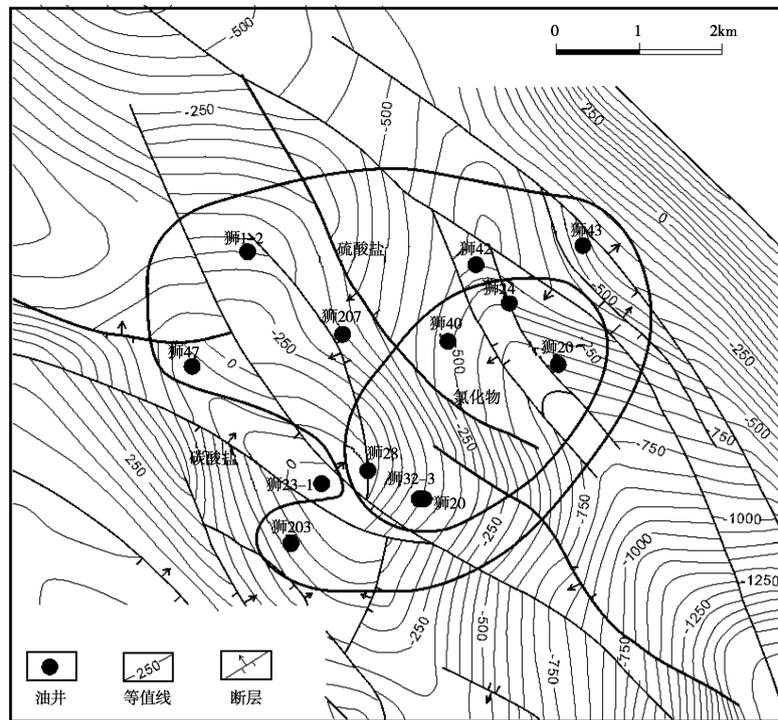


图 2 英西三维地震 K16 反射层构造图(据青海石油局)

Fig. 2 Structural map of three - dimensional seismic reflectors for K16 layer in Yingxi, Qaidam Basin

表 3 狮子沟背斜地区深层卤水离子比例系数

Table 3 Ionic ratios of deep brine in Shizigou anticline structure area

样品 编号	$\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$	$Br \times 10^3$ /Cl	$Br/I$	$SO_4 \times 10^2$ /Cl	$I \times 10^6$ /Cl	$\gamma_{Mg}/$ $\gamma_{Ca}$	$\gamma(Na + K)$ / $\gamma_{Cl}$	$K \times 10^3$ /TDS	$K \times 10^3$ /Cl	K/Br
狮 23 - 1	1.31	1.12	7.76	40.87	0.15	0.65	1.33	12.14	28.08	24.96
狮新 28	0.98	0.36	1.99	2.47	0.18	0.71	0.99	11.09	18.97	53.21
狮 24	1	0.16	1.77	5.99	0.09	0.2	1.02	20.93	36.94	233.11
狮 20	1.03	0.17	1.44	8.7	0.12	0.29	1.05	14.16	25.65	153.29
狮 40	1	0.22	1.32	6.25	0.17	0.15	1.02	17.36	30.68	140.93
狮 32 - 3	1	0.24	1.3	5.16	0.19	0.42	1.03	18.57	33.01	136.26
狮 1 - 2	1.04	0.18	1.59	7.75	0.11	0.11	1.06	12.53	22.55	128.4
狮 42	1.03	0.02	0.15	6.59	0.1	1.08	1.06	22.24	40.04	2 648.65
狮 47	1.04	0	0	10.63	0.2	0.27	1.08	25.83	48.14	70 240
狮 203	1	0.38	2.21	4.93	0.17	0.77	1.02	13.9	24.36	64.22
狮 207	1.08	0.08	0.81	12.95	0.1	0.3	1.1	15.47	29.05	369.28
狮 43	1.01	0.17	1.42	6.47	0.12	0.42	1.04	24.04	43.03	255.16
狮 201	1	0	0.02	4.9	0.1	0.86	1.03	23.77	42	24 460

Br 在海水蒸发浓缩过程中几乎不参加化学反应,大部分仍留在溶液中,其含量随着海水的浓缩而不断呈线性增加<sup>[10]</sup>。Br 和 Cl 在海水中同时

存在,海水中  $Br \times 10^3/Cl$  值为 3.4,当海水不断蒸发浓缩,石盐发生沉淀后,该特征值大于 3.4,则表示为古海水蒸发浓缩形成的变质卤水。在本次

研究所有调查油井的该系数值均小于 3.4, 并且大多数样品小于 1, 表现为溶盐卤水的特征。卤族元素 I 易在生物中富集, 由于海洋生物中该元素的富集,  $I \times 10^6 / Cl$  比值被用来鉴别卤水的形成是否与海相沉积物有关, 以正常海水中的 1 300 为界, 表中  $I \times 10^6 / Cl$  特征值均小于 5, 反映了溶盐卤水的特征, 而沉积卤水该值一般大于 80。

脱硫系数  $SO_4 \times 10^2 / Cl$  常用来表示卤水所处环境的封闭程度, 当该值越接近 0, 则表示卤水的封闭性越好, 还原性越好<sup>[11]</sup>。样品实验数据显示, 狮子沟背斜区深层卤水该特征值多数在 2.47 ~ 7.75 之间, 狮 47 井和狮 207 井的脱硫系数则分别为 10.63 和 12.95, 狮 23-1 中该特征值高达 40.87, 推测深层卤水受英西断层的影响, 封闭性和还原性均较差。另一方面, 由于下干柴沟组地层中沉积有丰富的石膏和钙芒硝等膏盐岩, 富含  $SO_4^{2-}$ , 膏盐岩的溶解很大程度上增加了卤水中  $SO_4^{2-}$  的含量, 也会导致深层卤水的脱硫系数升高。

$rMg/rCa$  的数值普遍小于 1, 反映出地下水来自灰岩的特点。 $r(Na + K)/rCl$  的值小于 1, 则表现为沉积卤水的特征<sup>[12]</sup>, 而表 3 中该比值普遍大于 1。

综上所述, 狮子沟背斜区深层卤水属于陆相沉积环境中源自灰岩、还原性较差的溶盐卤水。

卤水蒸发浓缩过程中, 会表现出碳酸盐—硫酸盐—氯化物的沉积规律。氯化物沉积阶段, 石盐首先沉积, 在石盐沉积阶段后期则开始沉积钾盐矿物。自然界中分布广、厚度大的石盐沉积可作为寻找钾盐矿的直接宏观标志<sup>[13]</sup>。地下卤水中含钾浓度是找钾的重要标志, 如  $K \times 10^3 / TDS$ 、 $K \times 10^3 / Cl$ 、 $K/Br$  等, 是反应卤水富钾程度的直接标志<sup>[14]</sup>。从表 3 可以看出,  $K \times 10^3 / TDS$  值在 11.09 ~ 25.83 之间,  $K \times 10^3 / Cl$  值在 18.97 ~ 48.14 之间, 可以大致肯定钾盐的存在, 并有希望找到钾盐矿床;  $K/Br$  值 24.96 ~ 70 240, 远远高于判断是否有钾盐溶滤的标准值 5.6, 且当钾溴系数为 25 ~ 50 时, 指示卤水可能已蒸发到析出钾盐的阶段。狮子沟地区溴钾系数普遍大于 25, 推测可能与油井揭露的富含盐类物质的地层有关, 同时也不排除残存沉积卤水加入的可能。

从以上离子特征系数可知, 狮子沟背斜区深

层卤水系陆相沉积环境中与灰岩有关的地下水溶滤新近系沉积地层中的盐岩物质, 且局部混合蒸发残余的沉积卤水而形成的盐岩溶滤卤水。

### 3 深层卤水化学演化

Br 在卤水中相对稳定, 在卤水的蒸发浓缩过程中不会形成独立矿物, 仅以离子的形式存在于溶液中, 且其浓度与矿化度呈正相关关系, 因此可用 Br 的浓度来表示卤水的浓缩程度<sup>[15]</sup>。对比研究区卤水与海水<sup>[10]</sup>、青海湖水蒸发曲线<sup>[16]</sup>, 可大致了解狮子沟背斜区深层卤水演化过程(图 3)。

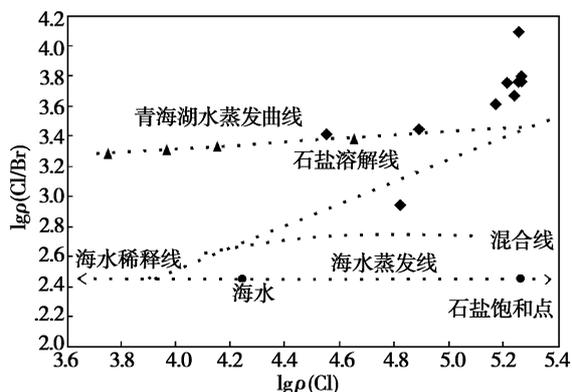


图 3 狮子沟背斜区深层卤水  $\lg \rho(Cl/Br) - \lg \rho(Cl)$  图解(图 3 至图 7 底图据<sup>[13]</sup>)

Fig. 3 Bivariate plot of  $\lg \rho(Cl/Br)$  and  $\lg \rho(Cl)$  of brines in the Shizigou anticline structure area

Na-Cl 图解(图 4)反映出, 狮子沟背斜区深层卤水样品均分布在石盐溶解线上或者附近; 而在  $\lg \rho(Cl/Br) - \lg \rho(Cl)$  图(图 3)中, 大部分样品分布在青海湖水蒸发线上方, 反映了蒸发浓缩和石盐溶解的双重作用。狮 47 井和狮新 28 井在图 4 中分布在青海湖水蒸发线上, 在图 3 中亦落在石盐溶解线上或附近, 表示狮 47 井和狮新 28 井同时经历了蒸发浓缩以及盐岩溶解的双重作用, 最终形成了残余盐湖卤水。狮 23-1 井位于石盐溶解线附近, 但是分布在青海湖水蒸发线下方, 且远离青海湖水蒸发线, 表明经过岩盐溶解的卤水正在进行强烈的蒸发作用。

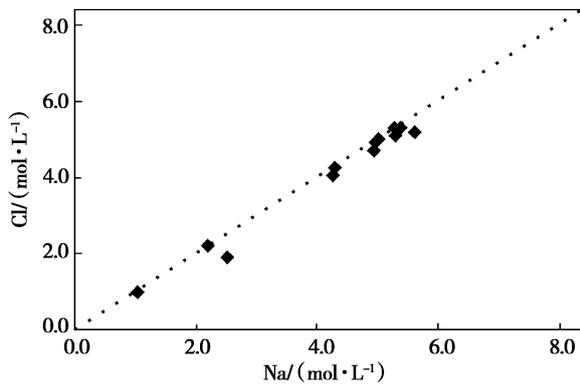


图 4 狮子沟背斜区深层卤水 Na - Cl 图解

Fig. 4 Bivariate plot of Na and Cl of deep brine in the Shizigou anticline structure area

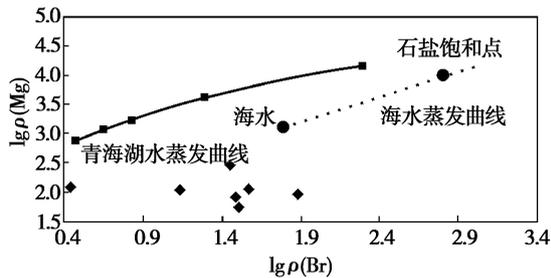
图 5 狮子沟背斜区深层卤水  $\lg \rho(\text{Br}) - \lg \rho(\text{Mg})$  图解

Fig. 5 Bivariate plot of  $\lg \rho(\text{Br})$  and  $\lg \rho(\text{Mg})$  of deep brine in the Shizigou anticline structure area

在  $\lg \rho(\text{Mg}) - \lg \rho(\text{Br})$  图解(图 5)中,样品均分布在青海湖水蒸发曲线及海水蒸发曲线下方,与两者相比狮子沟背斜区深层卤水表示出明显的贫镁特征。在  $\lg \rho(\text{Ca}) - \lg \rho(\text{Br})$  图解(图 6)中,较之青海湖水蒸发曲线,研究区深层卤水有更高的钙含量,只是这个特征相较之海水蒸发曲线并不明显;但是,仍可以说本地区深部卤水具有高钙低镁的特点。推测其原因,一方面灰岩的白云岩化作用对本地区深层卤水的影响较大,  $2\text{CaCO}_3 + \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{CaMg}(\text{CO}_3) + \text{Ca}^{2+}$ ,使得卤水中钙离子含量升高,镁离子含量减低;另一方面地下水体在运移过程中,溶滤下干柴沟组沉积地层中的膏盐类物质,也能造成钙离子的增加。

在  $\lg \rho(\text{Sr}) - \lg \rho(\text{Br})$  图解(图 7)中,大部分样品位于海水蒸发曲线上部,有着明显的富 Sr 特征。Sr 在自然界中主要以类质同象的方式赋存在造岩矿物中,由于 Ca 和 Sr 相似的化学性质特

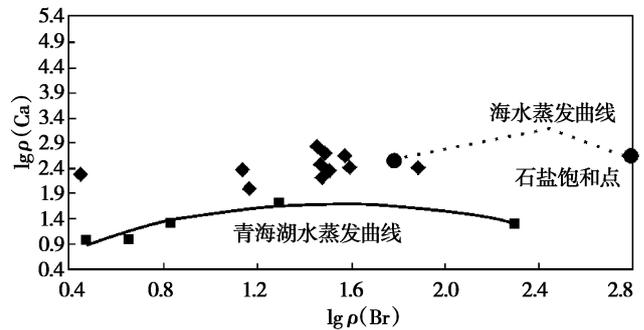
图 6 狮子沟背斜区深层卤水  $\lg \rho(\text{Br}) - \lg \rho(\text{Ca})$  图解

Fig. 6 Bivariate plot of  $\lg \rho(\text{Br})$  and  $\lg \rho(\text{Ca})$  of deep brine in the Shizigou anticline structure area

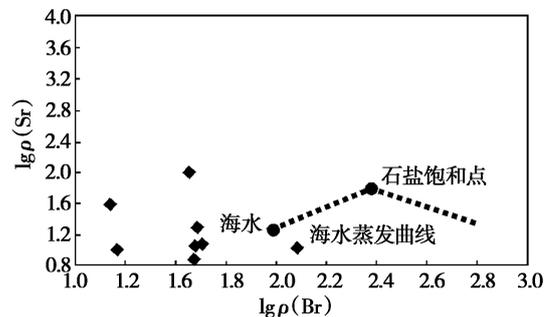
图 7 狮子沟背斜构造区深层卤水  $\lg \rho(\text{Br}) - \lg \rho(\text{Sr})$  图解

Fig. 7 Bivariate plot of  $\lg \rho(\text{Br})$  and  $\lg \rho(\text{Sr})$  of deep brine in the Shizigou anticline structure area

性,研究区深层卤水较高的 Sr 含量可能与石膏和碳酸盐等淋滤溶出有关;狮子沟背斜构造区深层卤水 Ca 和 Sr 两种元素的富集,推测可能与酸性斜长石的溶解密切相关,但也不能排除天青石溶解释放 Sr 的可能。

碱金属 Li 在岩石圈的上部富集,富集在岩浆演化的晚期阶段,在沉积岩中富集在海相细粒沉积物中<sup>[15]</sup>。易溶元素 B 在自然界主要存在于水圈及上地壳沉积岩系中<sup>[17]</sup>。研究区深部卤水源于陆相沉积环境,其中 Li 更有可能源自周围中酸性火成岩等矿物的溶滤;巨厚的沉积地层同时也可以提供丰富的 B 来源。大气降水或者地表水溶滤周边中酸性火成岩矿物以及巨厚的沉积地层,通过水岩反应形成富含 Li 和 B 的高矿化度卤水,并作用于研究区深层卤水。较之柴西第四纪盐湖卤水、新近纪和古近纪深部卤水,狮子沟背斜构造区深层卤水具有高 B、低 Sr、低 Li 的特点,综

合 Br 离子含量普遍偏低,推测可能与水体浓缩程度低有关。

上干柴沟组地层中的石膏随着埋藏深度的不断增加,失去结晶水形成硬石膏,富含有机酸的结晶水与地层中的碳酸盐岩等发生水岩反应,形成溶蚀孔洞;同时因该套地层中的泥晶白云岩在特殊咸化环境中形成,其晶间孔隙极度发育且在深层、超深层仍保存完好<sup>[18]</sup>;溶蚀孔洞、晶间孔隙和断裂共同为深层卤水提供运移通道及存储空间;大气降水沿着英西构造外围的阿克阿特山前洪积物形成地下水补给,沿着断裂与溶蚀孔洞不断溶滤上干柴沟组地层中的盐岩,形成地下卤水,与局部蒸发残余的沉积卤水、水岩作用形成的富 Li、B 淋滤水一起形成了狮子沟背斜构造区深层卤水。

## 4 结 论

1) 调查区内普遍发育第四系及新近系地层,其中在狮子沟背斜构造区仅发育新近系地层,以砂质岩、泥岩为主,夹有砾岩、碳酸盐岩;下干柴沟组发育有石盐、硬石膏、钙芒硝以及天青石等盐类物质。

2) 区内发育北西向和北北西向断层、成岩过程中结晶水脱水时水溶液溶滤碳酸盐岩形成的溶蚀孔洞、泥晶白云岩中的晶间孔隙共同为深层卤水提供运移及存储空间。

3) 该地区深层卤水水化学类型由外到内依次为碳酸钠型、硫酸钠型和氯化钙型,表现出盐类沉积矿床典型的环状沉积规律。

4) 区内深层卤水主要是盐岩溶滤卤水,演化受控于蒸发和溶解的双重作用,可能局部有沉积卤水及水岩作用形成的富 Li、B 淋滤水的加入。

5) 卤水中离子表现出富钙、贫镁、富锶的特点,表明白云岩化、酸性斜长石的溶解可能作用于区内深层卤水。

### 参考文献:

- [1] 于福生,王彦华,李学良,等.柴达木盆地狮子沟—油砂山构造带变形特征及成因模拟[J].大地构造与成矿学,2011,35(2):207-215.
- [2] 张世铭,张小军,张婷静,等.柴西狮子沟地区古近系下干柴沟组混积岩储层特征及影响因素分析[J].现代地质,2017,31(5):1059-1068.
- [3] 易定红,王建功,石亚军,等.柴西狮子沟地区渐新统下干柴沟组上段膏盐岩沉积演化特征[J].地质勘探,2017,37(5):1-9.
- [4] 隋立伟.柴达木盆地狮子沟—英东构造带断裂控藏作用[D].大庆:东北石油大学,2014.
- [5] 张津宁,张金功,杨乾政,等.膏盐岩对异常高压形成与分布的控制—以柴达木盆地狮子沟地区为例[J].沉积学报,2016,34(3):563-570.
- [6] 葛肖虹,张梅生,刘永江,等.阿尔金断裂研究的科学问题与研究思路[J].现代地质,1998,12(3):295-301.
- [7] 葛肖虹,任收麦,马立祥,等.青藏高原多期隆升的环境效应[J].地学前缘,2006,13(6):118-130.
- [8] 刘永江,肖虹,叶慧文,等.晚中生代以来阿尔金断裂的走滑模式[J].地球学报,2001,22(1):23-28.
- [9] 尹菲.四川盆地西南地区地下卤水水化学研究[D].北京:中国地质大学,2016.
- [10] 陈郁华.黄海海水等温蒸发时的析盐序列及微量元素分布规律[J].地质学报,1983,20(4):371-390.
- [11] 韩佳君,周训,姜长龙,等.柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及其起源演化[J].现代地质,2013,27(6):1455-1464.
- [12] Zhou X, Li C J. Hydrogeochemistry of deep formation brines in the central Sichuan Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 1992,138(1):1-15.
- [13] 谭红兵,曹成东,李廷伟,等.柴达木盆地西部古近系和深层卤水资源水化学特征及化学演化[J].古地理学报,2007,9(3):313-320.
- [14] 沈照理,刘光亚,杨成田,等.水文地质学[M].北京:科学出版社,1985.
- [15] 樊启顺,马海州,谭红兵,等.柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨[J].地球化学,2007,36(6):601-611.
- [16] 孙大鹏,李秉孝,马育华,等.青海湖湖水的蒸发试验研究[J].盐湖研究,1995,3(2):10-19.
- [17] 李廷伟,李建森,马海州,等.柴达木盆地西部深层卤水硼同位素地球化学研究[J].盐湖研究,2013,21(2):1-9.
- [18] 黄成刚,关新,倪祥龙,等.柴达木盆地英西地区 E<sub>3</sub> 咸化湖盆白云岩储集层特征及发育主控因素[J].天然气地球科学,2017,28(2):219-232.

[1] 于福生,王彦华,李学良,等.柴达木盆地狮子沟—油砂山

## Hydrochemical Characteristics and Evolutionary Process of Deep Brines from Shizigou Anticline Structure in Qaidam Basin, China

LIU Xi-xi<sup>1,2,3</sup>, YUE Xin<sup>1,2,3</sup>, YUAN Wen-hu<sup>1,2,3</sup>, FAN Zeng-lin<sup>1,2,3</sup>, YU Xiao-liang<sup>4</sup>,  
DONG Qi-wei<sup>1,2,3</sup>, CHEN Jin-niu<sup>1,2,3</sup>

- (1. *The Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud, 816000, China;*  
2. *The metallogeny and forecasting laboratory of Qinghai – Tibet Plateau Salt and Salt mineral Resources of Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud, 816000, China;*  
3. *The Saline Geology Survey of Qinghai Province, Golmud, 816000, China;*  
4. *The Geology Survey Bureau of Qinghai Province, Xining, 810000, China*)

**Abstract:** The investigation in recent years found that the oilfield brine from some anticline structures in the western Qaidam Basin was characterized by large reserves and high grade of valuable elements, which shows good prospect of development and utilization. Deep brine aquifer, even salt rocks, were found in Shizigou anticline structure area. In this study, a total of 13 brine samples were collected and analyzed for major and trace ionic contents in order to discuss the hydrochemical characteristics, origin and evolution of the brines. The conclusion includes that solutes of the deep brines of research area is mainly originated from rock salt dissolution and contribution from sedimentary brine is minor. The evolution of brines is mainly controlled by evaporation and dissolution, meanwhile, other processes including the dolomitization, dissolution of acid plagioclase and mixing of acid – neutral hydrothermal fluids also influenced the evolution of the brine.

**Key words:** Shizigou Anticline structure; Deep brine; Hydrochemical characteristics; Evolutionary analysis