

## 柴达木盆地西部卤水水化学特征与找钾研究

樊启顺<sup>1,2)</sup> 马海州<sup>1)</sup> 谭红兵<sup>1)</sup> 李廷伟<sup>1)</sup> 许建新<sup>1)</sup>

1) 中国科学院青海盐湖研究所, 青海西宁 810008; 2) 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 柴达木盆地自中生代末—新生代初以来, 四周山体不断抬升, 形成“高山深盆”的沉积环境, 为盆地带来了大量盐类物质, 再加上晚第三纪于早封闭的气候环境, 使其西部沉积了广阔而厚层的盐岩。在对柴达木盆地西部第三系、第四系地层出露盐矿点实地考察的过程中, 采集、分析了22件水样品的水化学组成, 通过 $K^+$ 含量及一些水化学系数变化特征的研究, 查明了卤水的水化学类型主要为氯化物型和硫酸镁亚型, 其成因基本属溶滤岩盐卤水、深部循环水以及二者的混合水体,  $Br^-$ 、 $B^{3+}$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Li^+$ 等微量离子含量较高, 区域差异性较大, 出现显著水化学系数异常; 相比之下, 柴达木盆地西部南翼山坳陷 $Br^-$ 、 $B^{3+}$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Li^+$ 含量值明显高于昆特依、察汗斯拉图、油砂山、开特米里克、油泉子、油墩子等坳陷区。 $Br \times 10^3/Cl$ 、 $K \times 10^3/Cl$ 等具找钾意义的水化学系数比其他地区高1~2倍,  $Br^-$ 、 $K^+$ 出现相对的富积, 推测该坳陷成盐原始卤水曾浓缩达到较高析盐阶段或可能有大量深部富钾水体的补给, 可作为寻找钾盐矿(富钾卤水)重点区域之一。

**关键词** 柴达木盆地西部, 卤水, 水化学特征, 钾盐

## Hydrochemical Characteristics of Brines and Potassium-Prospecting Researches in Western Qaidam Basin

FAN Qishun<sup>1,2)</sup> MA Haizhou<sup>1)</sup> TAN Hongbing<sup>1)</sup> LI Tingwei<sup>1)</sup> XU Jianxin<sup>1)</sup>

1) Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008;

2) Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** From Mesozoic to Cenozoic, the Qaidam Basin around big mountains unceasingly rose and formed a deposition environment of "high mountain and deep basin", thus yielding abundant sources of salts. Under the extremely drought climate environment of Late Tertiary, wide and thick strata of salt rock accumulated in the west basin. Therefore, this basin has been regarded as an important and favorable area in search for potash ore (salt brine of rich potassium). Based on such an understanding, the authors collected some brine samples around several representative salt mines and analyzed their hydrochemical components so as to find some clues to potash deposits. The results indicate that brines are exclusively of chloride type and sodium sulfate sub-type, and the formation of brines seems to be attributed to eluviation brine of rock salt and deep circulatory brine. Their chemical components vary from place to place in the area, with relatively high contents of Br, B, Sr, K, etc. A comparison shows that the Nanyishan depression in western Qaidam basin has obviously higher Br,  $B^{3+}$ ,  $Sr^{2+}$  and  $Li^+$  than some other depressions. This area hence can be considered to be one of the most promising areas in search for potash ore (salt brine of rich potassium).

**Key words** western Qaidam Basin, brines, hydrochemical characteristics, potash salt

盐类沉积是由地表浓缩的卤水经过蒸发、析盐沉淀作用而形成。其中, 溶解度最小的碳酸盐最先

沉积, 其次为硫酸盐, 最后为氯化物。氯化物中石盐沉积阶段的晚期即开始沉积钾盐类矿物, 因此那些

本文由国家自然科学基金项目(编号:40603007)和中国科学院重大基础研究前期研究项目(编号:2004CCA03500)共同资助。

责任编辑:刘志强; 收稿日期:2006-11-14; 改回日期:2007-01-10。

第一作者简介:樊启顺,男,1980年生,博士研究生,主要从事蒸发岩地球化学、盐湖演化的研究; 通讯地址:810008, 青海省西宁市新宁路18号; 电话:0971-6301694; E-mail: fanqishun100@163.com。

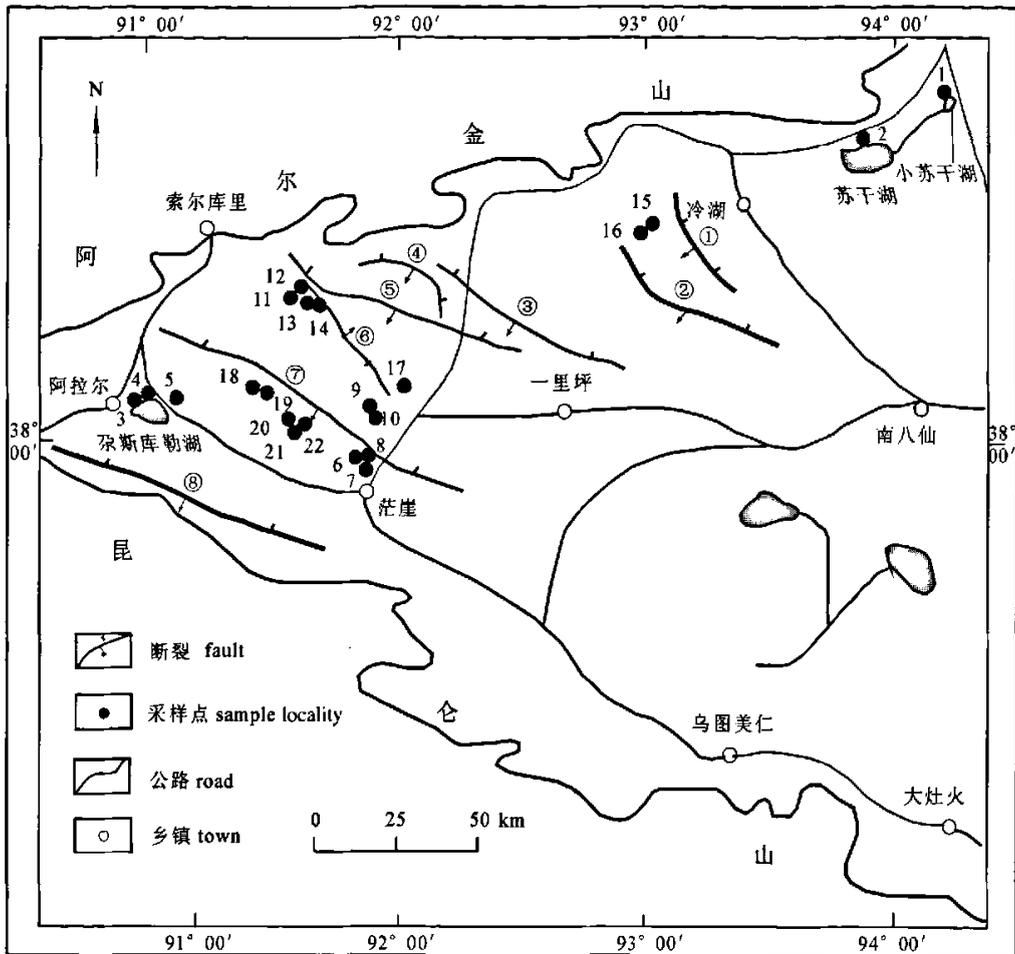


图1 柴达木盆地西部盐矿点分布图

Fig. 1 Distribution of salt minerals in west Qaidam Basin

1-小苏干湖;2-苏干湖;3-4-尕斯库勒;5-油砂山;6-8-茫崖;9-10-油墩子;11-14-南翼山;15-16-昆特依;17-察汗斯拉图;18-19-油泉子;20-22-开特米里克;①-冷湖-南八仙断裂;②-鄂博梁-鸭湖断裂;③-碱北山-红三旱断裂;④-尖顶山断裂;⑤-小梁山-大风山北断裂;⑥-南翼山断裂;⑦-油泉子北-油墩子北-落雁山断裂;⑧-阿拉尔断裂  
 1-Xiaosugan Lake;2-Sungan Lake;3-4-Gasikule Lake;5-Youshashan;6-8-Mangya;9-10-Youdunzi;11-14-Nanyishan;15-16-Kuntetyi;17-Chahansilatu;18-19-Youquanzi;20-22-Kaitemilike;①-Lenghu-NanbaXian fault;②-Eboliang-Yahu fault;③-Jianbeishan-Hongshan fault;④-JianDingShan fault;⑤-XiaoLiangShan-northern DaFengShan fault;⑥-NanYiShan fault;⑦-northern Youquanzi-northern Youdunzi-Luoyanshan fault;⑧-Alaer fault

分布广而厚层的石盐沉积自然是寻找和开发钾盐矿(富钾卤水)的直接宏观标志,但由于钾盐的易溶性以及只有卤水浓缩到最后阶段才会析出的矿物学特性,要在地表直接找到钾盐沉积地段是比较困难的。而自然界的水具有很大的流动性,它可能会成为钾盐矿床很好的指示剂,世界大多数钾盐矿床最初就是根据出露地表或钻探深层盐水或卤水而发现的,如前苏联东西伯利亚钾盐盆地、中亚一些钾盐盆地、

死海盆地(钱自强等,1994)、四川盆地海相三叠纪富钾卤水的发现(林耀庭等,2002)、以及塔里木盆地西部古盐矿点卤水及找钾远景区圈定等(谭红兵等,2004)。因此,研究盐类沉积周围出露的各种卤水、湖(河)水、盐泉水等,不仅可指示成盐盆地卤水的形成、蒸发及盐类沉积的发展阶段,以及固相沉积物(特别是深层盐体)的组分特征,进一步证实钾盐的存在,而且对于岩盐分布区找钾都有实际的指示

意义。由于研究手段和目的的限制,该区成盐物质来源与古卤水分异演化特征、最终的浓缩阶段这些成钾的微观基础问题并没有开展过详细的研究。基于此,笔者于2005年9月-10月期间在考察柴达木盆地西部巨厚盐矿点时(图1),有针对性地采集了一些古盐矿点周围与岩盐关系密切的22件水样品(个别咸湖水、盐湖水、油田水、晶间卤水)进行了水化学分析,从卤水的水化学特征来判断其溶解的固相盐类矿物组成,特别是指导判断是否有隐伏的、达到蒸发岩沉积晚期阶段的钾盐矿床,为进一步开展该区古钾盐或富钾卤水找矿提供理论依据。

## 1 区域地质背景及采样点分布

柴达木盆地位于世界屋脊帕米尔—青藏高原北部,四周被昆仑山、阿尔金山和祁连山所夹持,大致呈一个不规则菱形区带。盆地东西长850 km,南北宽150~300 km,面积约 $12.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。柴达木地块在海西造山运动以前,是横贯欧亚大陆南部的古特提斯海的组成部分。自海西运动以来,柴达木地块经历了多次的造山运动,每次造山运动不仅使柴达木地块脱离海相环境,而且加剧了盆地边缘深大断裂(带)的活动。直到中生代末—新生代初以来,板块的强烈俯冲,四周山体不断抬升,中央坳陷盆地主体形成,盆地西部逐渐形成“高山深盆”的沉积环境(袁见齐等,1983),为盆地带来了大量的盐类碎屑物质。再加上干旱的气候条件,加剧了成盐作用的强度,沉积了巨厚的盐层(张彭熹等,1987)。所以,柴达木盆地第三系、第四系地层普遍含有盐类矿产。

柴达木盆地是由昆仑山、阿尔金山和祁连山所围的大型内陆湖盆。其西部地区是指柴达木盆地牛鼻子梁—大风山—东柴山一线以西的地区(党玉棋等,2004),是主力石油产区(郭泽清等,2005),也是盆地内岩盐沉积最厚、沉积时代最老的地区。出露的第三系、第四系岩盐主要分布于狮子沟—茫崖一带深大断裂凹陷地带,如红柳泉—甘森断裂、油泉子北—油墩子北—落雁山断裂、尖顶山断裂、小梁山—大风山北断裂、南翼山断裂、阿拉尔断裂等(图1)。走向大致为NW-SE向,沉积了环状的岩盐地层,形成了典型的“大咸盆套小盐湖”的蒸发岩沉积模式(金强等,2000)。因此,这些凹陷区内都沉积了巨厚的新生代地层,其中包括湖泊相建造的第三系含

盐层,即在下干柴沟组( $E_1^3$ )、上干柴沟组( $E_2^3$ )、油砂山组( $N_1^3$ )和狮子沟组( $N_2^3$ )沉积了大量的蒸发岩类:岩盐、石膏、芒硝和碳酸盐(泥灰岩和钙质泥岩)等。在平面上,蒸发岩的分布具有环状结构:氯化物位于沉积中心部位,硫酸盐分布范围大于氯化物,碳酸盐分布范围最广。其中碳酸盐主要是浅水沉积,硫酸盐和氯化物是较深水、深水环境的产物。由于盆地周缘淡水供给的不均一性、蒸发作用、气候干湿的持久性以及地形地貌的微弱变化等,都会造成盐湖水体时深时浅,所以在氯化物和硫酸盐沉积区的纵向上,常见到氯化物、硫酸盐、碳酸盐的沉积旋回。从岩盐矿产的发育规模看,柴达木盆地西部地区古岩盐沉积巨厚、古卤水发育,且出露的油田卤水普遍富钾(付建龙等,2005),其前缘第四纪形成的一些盐湖也有大量钾盐资源分布。此次野外调查取样,选取了柴达木盆地西部茫崖、油墩子、南翼山、昆特依、察汗斯拉图、尕斯库勒、油砂山、油泉子、开特米里克等岩盐区作为重点调查区,获得了20件卤水及2个湖水样品(表1)。

## 2 样品分析

卤水样品采样量500 ml,现场测其比重后封口作为实验室分析。分析测试常量离子成分 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 采用常规重量法(误差0.5%)和滴定法(误差0.2%~0.3%)测定;微量离子成分 $\text{Br}^-$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Li}^+$ 采用原子吸收光谱法(误差小于2%); $\text{B}^{3+}$ 含量采用吸光度法(误差小于1%)。

## 3 卤水水化学特征

### 3.1 常量离子含量变化特征与水化学类型

从水化学分析结果看,盆地西部卤水样矿化度普遍较高,为197.8~485.7 g/l,比所采集的2个咸湖水样(XSGH-01、DSGH-01)高数十甚至上百倍。其中,南翼山卤水样品矿化度最高,达到485.7 g/l;其次,油泉子、昆特依、尕斯库勒、茫崖、油墩子、察汗斯拉图、开特米里克、油砂山等地的卤水样品矿化度较高,达到197.8~383.8 g/l。从水溶液密度来看,湖(河)水样密度为 $1.000 \sim 1.018 \text{ g/cm}^3$ 之间,卤水水样比重为 $1.129 \sim 1.320 \text{ g/cm}^3$ 。常量离子中, $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 占绝对优势, $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 含量较低。因此水化学类型大部分属氯化物型和硫酸盐

表1 柴达木盆地西部卤水采样点野外登记简表  
Table 1 Field records of brines sampled from western Qaidam Basin

样点名称	点位(纬度—经度)	海拔/m	样品编号	采样地点特征
小苏打湖	39°04'15.7"N ~ 94°12'4.60"E	2691	XSGH-01	湖岸表面见有1~2 cm厚石盐晶体。
大苏打湖	38°53'50.0"N ~ 93°54'11.7"E	2695	DSGH-01	湖水微咸,湖岸长有芦苇,鸟类生存。
尕斯库勒	38°09'55.3"N ~ 90°49'27.8"E	2850	GSKL-01 GSKL-02	湖岸表面有白色厚层石盐晶体析出。
油砂山	38°10'55.1"N ~ 90°53'21.7"E	2974	ZK-5034	尕斯采油一厂南区钻孔 ZK-5034 并取得油田卤水,据调查为该采油区唯一见有卤水井。
茫崖	37°52'03.6"N ~ 91°50'20.7"E	2865	MYDD-01 MYDX-Z MYDX-B	老茫崖处见有一片裸露地表的卤水湖。湖东为干盐滩,湖西盐湖卤水丰富。
油墩子	38°03'9.50"N ~ 91°51'59.3"E	2792	YDZ-01 YDZ-02	盐滩—报废油井,地表被盐壳覆盖,出露刺鼻、灰色浑浊卤水,出水量大,有气泡溢出。
南翼山	38°22'9.90"N ~ 91°26'17.3"E	2795	NYS-01	南翼山石油钻井,浅7~2井处,地表汇集卤水。见有汇卤水湖,湖水颜色发黄,湖岸有约5 cm厚的盐壳,湖中见有黑色油水和圆锥状白色盐华,中心有孔。
			NYS-02	
			NYS-03	
			NYS-04	
昆特依	38°32'6.60"N ~ 93°00'27.8"E	2724	KTY-01 KTY-02	地表以下埋深3 m处有晶间卤水出露,表面分布次生亮晶石膏。
察汗斯拉图	38°03'12.1"N ~ 91°51'58.4"E	2720	CHSLT-01	见有白色石盐厚层和泥灰色黑色含泥碳酸岩,野外用盐酸滴定,表层见有大量气泡冒出。
油泉子	38°13'24.0"N ~ 91°25'11.6"E	2902	YQZQ-01	油浅54井石油分离池油田水,表面漂有一薄层黑色粘稠物。
			YQZQ-02	
开特米里克	38°04'49.0"N ~ 91°40'27.5"E	2788	KTMLK-01	一民用采油井,深约400~500 m,溢出水最小,有苦、咸等异味。自喷油田水、浑浊刺鼻,水量大。淡黄色油水,刺鼻。密度为1.092。
			KTMLK-02	
			KTMLK-03	

型。油墩子、南翼山、察汗斯拉图、油泉子、油砂山、开特米里克等地水样水化学类型为氯化物型;茫崖、尕斯库勒、昆特依等地表卤水或晶间卤水水化学类型为硫酸镁亚型;大苏打湖水样水化学类型为硫酸钠亚型。这主要是由于“大咸盆套小盐湖”沉积模式决定的,中心部位沉积了大量的含石盐泥岩、岩盐,外围沉积了含膏泥岩、石膏、天青石等矿物。只有盆地北部地区小苏打湖(样品号为XSGH-01)的湖水分析中发现,CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>含量(0.223 g/l)较高,其余离子含量相对均较低,水化学类型属于碳酸盐型。

就找钾的直接标志—K<sup>+</sup>的绝对含量而言,普遍较高,除9个样品浓度低于1 g/l外,其余13个样品浓度均高于2 g/l。相比之下,南翼山盐点4件油田卤水样品(NYS-01~04)和昆特依干盐滩2个晶间卤水样品(KTY-01~02)K<sup>+</sup>的浓度最高,平均值分别为20.20 g/l、11.63 g/l;其次尕斯库勒2个湖表卤水样品(GSKL-01~02)、茫崖3个浅层卤水样品(MYDD-01、MYDX-Z、MYDX-B)、油墩子2个油田卤水样品(YDZ-01~02)、察汗斯拉图1个晶间卤水样品(CHSLT-01)等地K<sup>+</sup>的浓度较高,平均值分别为6.79 g/l、2.85 g/l、2.17 g/l、2.07 g/l;北部地区的

湖水(XSGH-01~02)以及油泉子、开特米里克地区的油田卤水(YQZQ-01~02、KTMLK-01~03)浓度普遍较低,平均值为0.26~0.69 g/l。其中南翼山1个样品(NYS-03)K<sup>+</sup>含量异常高,达到37.5 g/l(折合KCl为71.63 g/l),不仅远高于国内青海察尔汗盐湖(K<sup>+</sup>含量达到12.1 g/l)、西藏扎布耶盐湖(K<sup>+</sup>含量达到27.0 g/l),也远高于世界上K<sup>+</sup>含量最高的卤水。如智利阿塔卡玛K<sup>+</sup>含量为23.6 g/l、美国西尔斯盐湖卤水K<sup>+</sup>含量为23.1 g/l等(林耀庭等,1997),是国内外含钾卤水含钾量的2~10倍。按我国2002年修订颁发的《盐湖和盐类矿产地质勘查规范》的要求(中华人民共和国地质矿产行业标准:DZ/T0212-2002,2003),开采卤水的KCl边界品位为≥0.3%~0.5%,最低工业品位为≥0.5%~1.0%;开采固态钾矿(露天开采)的KCl边界品位为≥3%,最低工业品位为≥8%,而南翼山地区卤水的K<sup>+</sup>折合成KCl已达5.43%,已远超出此标准(图2),具有潜在的资源意义。其他常量离子的变化趋势几乎与K<sup>+</sup>同步,总体上所有样品常量离子含量较高。

### 3.2 微量离子含量变化特征

对于盐矿床尤其是找钾的研究来说,除了研究

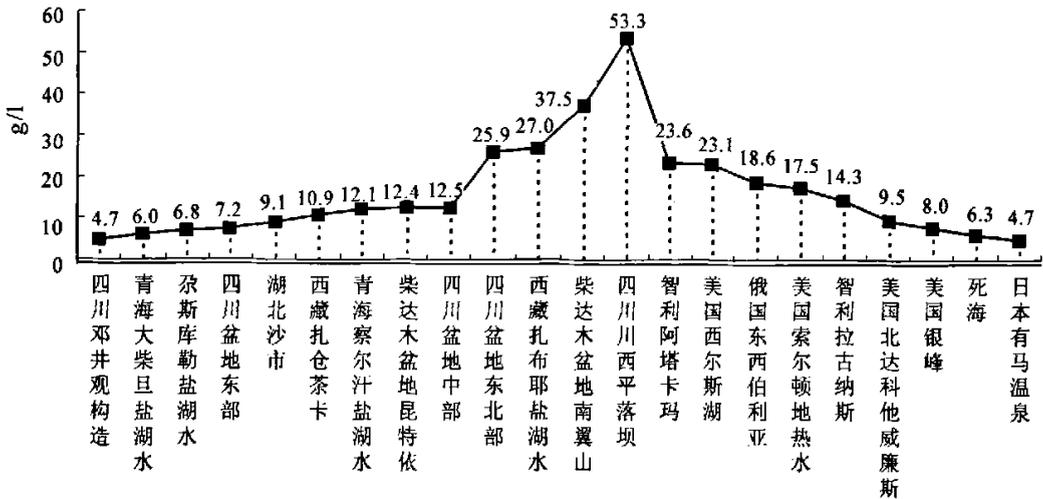


图2 柴达木盆地西部卤水与国内外含钾量对比图

(数字表示含钾数据,除柴达木盆地西部卤水样品为本次测定外,其余数据林耀庭等,1997)

Fig. 2 Comparison of K contents in the potassium-rich and high-grade brines from Qaidam Basin with those in other K-bearing brines at home and abroad (data show K<sup>+</sup> content. Besides the data of western Qaidam Basin, all datum from Lin et al., 1997)

卤水中常量离子的含量和变化特征之外,还要研究一些指导寻找钾矿(盐)的微量离子的特征变化。作为盐矿床中最有效、灵敏的Br元素而言,它在地壳中的丰度为 $2.15 \times 10^{-4}$ ,主要是以分散状态在自然界存在,一般不单独成矿,而易和金属、碱土金属形成溶于水的化合物,还可以配位体的形式与金属、碱土金属形成稳定的络合物(曾昭华等,2001)。在石盐沉积阶段,随卤水浓缩主要集中在残留液中,其中一部分Br<sup>-</sup>以类质同像置换氯化物盐类矿物中的Cl<sup>-</sup>,且置换量与共沉淀的溶液中Br<sup>-</sup>含量成正比例关系。因此,残留液中或盐类矿物中Br<sup>-</sup>含量越高,均表明卤水浓缩程度越高、形成盐类矿物沉积阶段越晚(瓦良亚什科,1965),越有利于最后沉积阶段的K<sup>+</sup>盐类矿物的浓缩析出。B是易溶元素,在自然界主要存在于水圈及上地壳沉积岩系中,对于沉积环境及各种地质作用具有明显的指示意义,是判别沉积环境、物源的有效地球化学参数(肖荣阁等,1999;蒋少涌,2000)。Sr是典型的分散元素,在自然界中主要以类质同像的形式分布在造岩矿物中,是判断水体的补给来源、古沉积环境的有效地球化学参数(张西营等,2002;王增银等,2003)。

总体上看,柴达木盆地西部岩盐出露区卤水

(除大、小苏打湖湖水外)中Br<sup>-</sup>含量都较高,B<sup>3+</sup>、Sr<sup>2+</sup>、Li<sup>+</sup>等含量也不低(表2),但区域差异性较大,地区分布很不均匀。苏打湖地区湖水矿化度较低,各离子含量相应地都较低,主要是由于山前地表水补给的缘故。Br<sup>-</sup>、B<sup>3+</sup>、Sr<sup>2+</sup>、Li<sup>+</sup>含量最高值(NYS-03)分别为537 mg/l、3343 mg/l、4450 mg/l、1890 mg/l;最低值(MYDD-01)分别为15.3 mg/l、56.5 mg/l、22.6 mg/l、1.97 mg/l。相比之下,柴达木盆地西部南翼山次级坳陷盐湖沉积区Br<sup>-</sup>含量最高,明显高于察汗斯拉图、开特米里克、油砂山、油泉子等盐湖沉积区。并且其它(B<sup>3+</sup>、Sr<sup>2+</sup>、Li<sup>+</sup>)微量离子的变化趋势几乎与Br<sup>-</sup>有同步变化规律。说明高浓度的Li、B、Sr、Br等有益组分不仅与中、晚新生代以来陆—陆碰撞导致深部再熔岩浆形成及热水二次淋滤富集与补给有关(郑绵平,2001);而且还与漫长的地史演化过程,经历了沉积、深埋、变质、溶解等发展阶段,经过多次复杂的改造,水化学组成发生改变,朝着深度变质及高矿化方向发展,使其离子含量较高。

### 3.3 常量和微量离子含量聚类及因子分析

卤水通常出露在岩盐分布区,反映了岩盐沉积和卤水演化的信息。卤水中常量和微量离子聚类和

表2 柴达木盆地西部卤水水化学分析表  
Table 2 Chemical and isotopic analyses of brines from western Qaidam Basin

N	Sample	采样类型	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	TDS [g/l]	K <sup>+</sup> [g/l]	Na <sup>+</sup> [g/l]	Ca <sup>2+</sup> [g/l]	Mg <sup>2+</sup> [g/l]	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [g/l]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [g/l]	Cl <sup>-</sup> [g/l]	Br <sup>-</sup> [mg/l]	Li <sup>+</sup> [mg/l]	Si <sup>2+</sup> [mg/l]	B <sup>3+</sup> [mg/l]	Hydrochemical Type
1	XSGH-01	湖水	0.9996	3.80	0.032	0.678	0.07	0.14	0.91	0.187	0.78	—	—	0.56	2.46	碳酸盐型
2	SGH-01	湖水	1.0176	26.5	0.350	6.310	0.15	1.51	8.36	0.907	7.81	1.37	1.06	6.84	28.6	硫酸钠亚型
3	GSKL-01	湖表卤水	1.2537	359.3	6.73	57.16	0.08	46.61	70.02	1.50	176.8	54.10	45.5	—	185.4	硫酸镁亚型
4	GSKL-02	湖表卤水	1.2509	359.7	6.84	57.29	0.08	46.65	69.25	1.50	177.7	53.30	45.3	—	185.4	硫酸镁亚型
5	ZK-5034	油田卤水	1.1287	197.8	0.30	68.48	6.51	1.30	0.57	0.07	120.0	98.0	2.10	253	250.6	氯化物型
6	MYDD-01	晶间卤水	1.2032	320.2	0.99	117.3	0.89	4.03	7.330	0.17	189.5	15.3	1.97	22.6	56.5	硫酸镁亚型
7	MYDX-Z	浅层卤水	1.2096	326.9	3.79	111.5	0.61	7.83	15.02	0.72	187.2	20.1	23.9	69.1	206.5	硫酸镁亚型
8	MYDX-B	浅层卤水	1.2088	327.1	3.76	111.5	0.55	7.97	15.10	0.75	187.3	21.3	24.5	67.0	205.0	硫酸镁亚型
9	YDZ-01	油田卤水	1.2014	320.4	2.50	117.8	4.84	0.84	1.34	0.23	192.2	59.5	20.9	116	484.5	氯化物型
10	YDZ-02	油田卤水	1.2013	318.9	1.84	116.6	4.45	1.79	1.56	0.31	191.8	79.3	13.0	85.4	394.4	氯化物型
11	NYS-01	油田卤水	1.2054	326.5	4.20	105.7	12.92	2.48	0.66	0.53	194.5	84.2	175	536	875.8	氯化物型
12	NYS-02	油田卤水	1.2048	327.0	3.89	106.6	12.88	2.50	0.67	0.54	195.7	90.8	175	528	872.7	氯化物型
13	NYS-03	油田卤水	1.3195	485.7	37.5	15.04	118	7.78	0.03	—	297.2	537	1890	5230	3978	氯化物型
14	NYS-04	油田卤水	1.2596	402.2	35.75	44.84	69.1	5.05	0.16	0.29	237.9	281	1120	4450	3332	氯化物型
15	KTY-01	晶间卤水	1.2446	370.3	12.36	108.2	0.41	13.91	60.20	0.18	175.0	17.2	5.65	—	63.4	硫酸镁亚型
16	KTY-02	晶间卤水	1.2352	358.7	10.89	106.7	0.29	13.58	48.26	0.20	178.8	16.6	5.62	—	44.4	硫酸镁亚型
17	CHSLT-01	晶间卤水	1.2028	319.8	2.07	113.8	6.74	2.25	1.31	0.25	192.5	105	14.7	132	614.9	氯化物型
18	YQZQ-01	油田卤水	1.1010	379.0	0.78	167.1	13.6	2.06	0.19	0.00	176.2	80.9	91.6	—	665.0	氯化物型
19	YQZQ-02	油田卤水	1.1940	383.8	0.60	187.5	13.5	2.13	0.15	0.00	179.6	79.1	89.9	—	733.0	氯化物型
20	KTMLK-01	油田卤水	1.1160	220.4	0.25	113.1	2.62	1.61	3.59	0.22	98.74	102.1	33.8	—	431.0	氯化物型
21	KTMLK-02	油田卤水	1.0980	214.6	0.18	124.3	2.25	1.68	4.08	0.35	81.39	97.9	44.0	—	607.0	氯化物型
22	KTMLK-03	油田卤水	1.0920	208.1	0.35	123.7	2.39	1.23	3.33	0.29	76.55	89.2	66.3	—	626.0	氯化物型
23	XLS-01 <sup>①</sup>	油田卤水	—	154.1	0.84	57.25	1.58	0.33	2.05	0.00	89.01	54.8	36.0	7.50	84.4	氯化物型

注：样品由中国科学院青海盐湖研究所分析室完成；水化学类型按M.T.瓦良什科夫分类方法计算；“—”表示没有检测；标有“①”资料来源为（青海省地质调查院，2003）。

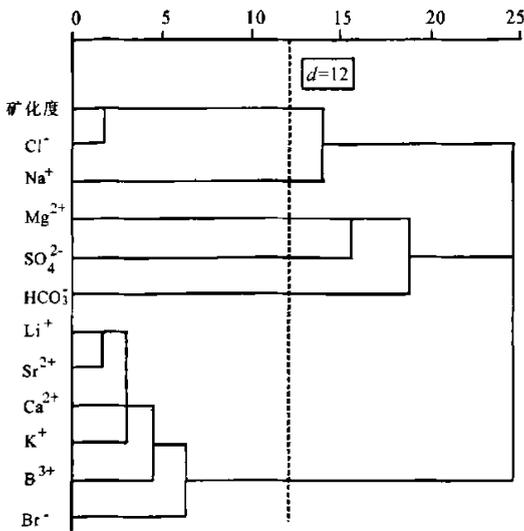


图3 柴达木盆地西部卤水基本成分聚类分析谱系图

Fig. 3 Cluster analysis of basic compositions for brines from western Qaidam Basin

因子分析,是搞清卤水中不同离子分类和相关程度的有效方法。从柴达木盆地西部卤水基本成分聚类分析谱系图看(图3,以欧氏距离12为分类标准),矿化度、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 首先聚为一类,说明卤水矿化度与溶解的石盐矿物( $\text{NaCl}$ )相关,水—盐的溶滤作用增强是卤水矿化度增高的重要因子;而 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 聚为一类,说明卤水在迁移演化途中有地表卤水或浅层硫酸盐型卤水的掺合;而 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 聚为一亚类,再和 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 聚为一类,最终与 $\text{B}^{3+}$ 、 $\text{Br}^-$ 聚为一大类,说明卤水中微量离子( $\text{Li}^+$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{B}^{3+}$ 、 $\text{Br}^-$ )与常量离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ )具有很强的相关性,具有的相同的物源条件。而较高的 $\text{Ca}^{2+}$ 特征,反映了卤水可能发生了白云岩化作用(瓦良亚什科,1965),具有深部卤水的特征。另外,从柴达木盆地西部卤水基本成分因子分析表(表3)可以看出,第一主因子主要由 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{B}^{3+}$ 、 $\text{Br}^-$ 决定,反映了卤水离子中85.2%的信息;第二主因子主要由 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 决定;第三主因子主要由 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 决定。因此,从卤水聚类和因子分析图表中得出,柴达木盆地西部卤水大部分卤水具有深源的特征,在卤水迁移途中,溶滤了周围的岩盐,具有高的矿化度,后期有地表水体掺合,也从侧面反映了卤水演化的复杂性。

万方数据

表3 柴达木盆地西部卤水基本成分因子分析

Table 3 Factor analysis of basic components of brines from western Qaidam Basin

离子名称	主要成分		
	1	2	3
$\text{K}^+$	0.149	0.043	-0.025
$\text{Na}^+$	-0.124	-0.067	0.605
$\text{Ca}^{2+}$	0.143	-0.006	-0.034
$\text{Mg}^{2+}$	0.123	0.373	0.205
$\text{SO}_4^{2-}$	0.022	0.442	0.003
$\text{HCO}_3^-$	0.023	0.392	-0.169
$\text{Cl}^-$	0.058	-0.037	0.528
$\text{Br}^-$	0.128	-0.064	0.003
$\text{Li}^+$	0.148	0.018	-0.045
$\text{Sr}^{2+}$	0.146	0.012	-0.050
$\text{B}^{3+}$	0.138	-0.15	0.004

#### 4 卤水成因与水化学找钾分析

实践表明,一般在内陆盐湖分布区盐类沉积周围可能遇到以下几种类型的水晕:由湖水持续蒸发残留的湖表卤水;存在于蒸发盐层中的晶间卤水;淡水溶解周围的蒸发岩形成的溶解水体;深部来源的水体以及深部来源水体同其它卤水的混合水体。深部水可能包括油田水、岩浆中的水或由岩浆派生的水以及中酸性火山岩水热循环的地下热水溶液等所形成的。研究卤水成因是搞清蒸发岩蒸发析盐过程的重要依据。由于 $\text{Cl}^-$ 在溶液中是很稳定的组分,其离子间的比例关系不会因淡水淡化而发生改变(林耀庭等,1999),通常采用的离子系数有 $\text{Br} \times 10^3/\text{Cl}$ 、 $\text{K}/\text{Br}$ 、 $\text{K} \times 10^3/\text{Cl}$ 、 $\text{Na}/\text{Cl}$ 五种(陈郁华译,1972;袁见齐,1975)。

一般而言,溴氯系数( $\text{Br} \times 10^3/\text{Cl}$ )是判别卤水蒸发沉积阶段的重要的地球化学标志,可作为钾盐找矿的标志。 $\text{Na}/\text{Cl}$ 比值的增高代表着地表风化作用带来更多的 $\text{Na}$ 而明显缺少 $\text{Cl}$ ;并且卤水中的 $\text{C}_{\text{Na}}/\text{C}_{\text{Cl}}$ (摩尔浓度比)、 $\text{Br} \times 10^3/\text{Cl}$ 两系数具有最大的稳定性。当 $\text{C}_{\text{Na}}/\text{C}_{\text{Cl}}$ 约为0.86~0.87, $\text{Br} \times 10^3/\text{Cl}$ 为0.33时,为海成沉积卤水;当 $\text{C}_{\text{Na}}/\text{C}_{\text{Cl}}$ 值为0.87~0.99或更高和 $\text{Br} \times 10^3/\text{Cl}$ 值为0.33或更小时,则为岩盐溶滤卤水;当 $\text{C}_{\text{Na}}/\text{C}_{\text{Cl}}$ 值小于0.87和 $\text{Br} \times 10^3/\text{Cl}$ 值大于0.33时,则为沉积变质卤水(林耀庭等,2002)。根据这些水化学特征,就可判别水的成因类型,而且还可从溶滤卤水的化学成分中推测固

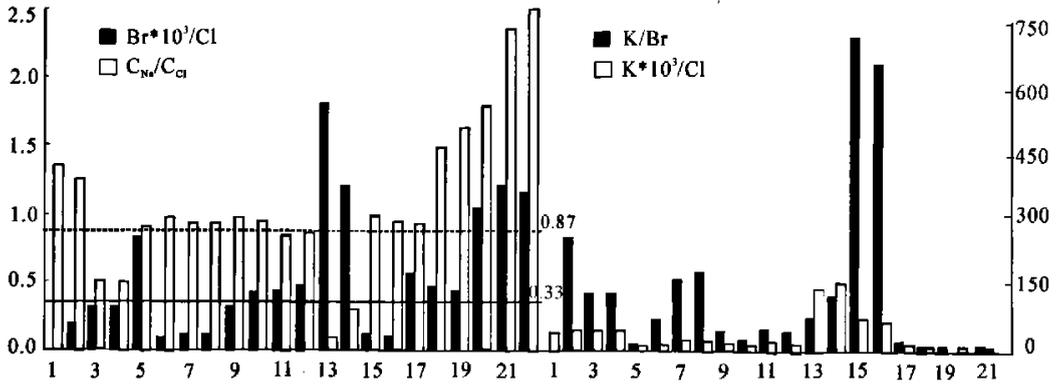


图4 柴达木盆地西部卤水特征离子含量对比图

Fig. 4 Histogram showing content ratios of characteristic hydronium ions in brines of western Qaidam Basin

相沉积物的主要组分和矿物类型,进一步判断当时卤水的浓缩程度或变质情况。

因此,根据图4总体可以看出:大部分盐矿点  $C_{Na}/C_{Cl}$  值基本都等于0.87或更高,  $Br \times 10^3/Cl$  值为0.33或更小,这些卤水基本上属于溶滤岩盐卤水。但是13、14号(NYS-03、NYS-04)样品  $Br \times 10^3/Cl$  值(分别为1.8068、1.1814)异常高,  $C_{Na}/C_{Cl}$  值(分别为0.078、0.291)异常低;并且  $Ca^{2+}$ 、 $Cl^-$  含量(分别为117.9 g/l、297.2 g/l)异常高,说明南翼山地区卤水可能来源于深部  $CaCl_2$  型循环水,与柴达木盆地盐湖钾盐矿床形成的卤水部分源于深部  $CaCl_2$  型水成因相似(郑喜玉,1986;张彭熹等,1991;袁见齐等,1995)。这说明深部成因的卤水封闭性较好,变质程度较高,不受地表水体或风化作用的影响,属于沉积变质卤水。20、21、22号(KTMLK-01、KTMLK-02、KTMLK-03)样品  $Br \times 10^3/Cl$  值(分别为1.034、1.203、1.165)较高,  $C_{Na}/C_{Cl}$  值(分别为1.767、2.357、2.493)也异常高,说明开特米里克地区卤水受到地表风化作用的影响,可能来源于地表大气降水溶蚀露头区盐类矿物水和深部循环水的混合水体,这与通过Pitzer模型对柴达木盆地盐湖水体来源的研究,认为柴达木盆地众多盐湖的形成不可能仅仅是地表河流水体直接蒸发浓缩的结果,而是地表补给河水同富  $CaCl_2$  的深部水以不同的比例混合掺杂后蒸发浓缩形成的结论一致(刘兴起等,2002)。

从  $C_{Na}/C_{Cl}$  值可以推测卤水溶滤的岩盐主要为石盐矿物,  $K^+$ 、 $Br^-$  的较高含量特征反映在溶解的岩

盐形成时的原始卤水浓缩程度较高,可能达到钾盐或更为晚期的盐类矿物析出阶段,这与在大浪滩凹陷区出露卤水浓缩到晚期阶段的钾盐类矿物(钾石盐、光卤石、软钾镁矾)基本吻合(王弭力等,1996)。另外,从图4可以看到,大部分盐点卤水  $K/Br$  值、 $K \times 10^3/Cl$  值都比较低,变化不明显;说明了盆地西部原始卤水浓缩程度较高。相比之下,15、16号(KTY-01、KTY-02)样品  $K/Br$  值异常高( $Br^-$  含量最低,其值分别为17.2 mg/l、16.6 mg/l),而  $K \times 10^3/Cl$  值相对较低,说明昆特依晶间卤水的浓缩程度较低,这与昆特依水体为硫酸镁亚型有关;13、14号(NYS-03、NYS-04)样品  $K/Br$  值较低( $Br^-$  含量最高,其值分别为537 mg/l、281 mg/l),而  $K \times 10^3/Cl$  值相对较高( $Cl^-$  含量最高,其值分别为297 mg/l、237 mg/l),这种不协调变化说明南翼山地区卤水中  $K^+$  含量高,是我们应该寻找钾盐矿(富钾卤水)重点区域之一。另外,油泉子、开特米里克、油墩子等地较高的  $Br^-$ 、 $K^+$  等含量,说明这些区域也是我们应该注意研究的对象。柴达木盆地西部卤水的离子含量普遍较高,可能是盆地西部形成的众多褶皱和断裂构造单元,为盆地提供了丰富的深部富钾卤水有关;另外,盆地西部大部分溶滤岩盐成因的卤水富钾含量也从侧面暗示了第三系岩盐中可能有固体钾盐矿物的沉积。

### 5 结论

(1) 柴达木盆地西部岩盐分布区出露卤水水化学离子含量普遍较高,区域差异性较大。南翼山地

区水化学特征尤其明显,  $K^+$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Br^-$ 、 $B^{3+}$ 、 $Li^+$  等含量最高;

(2) 从特征离子的比值分析认为卤水成因类型基本为溶滤岩盐卤水、深部水以及二者的混合水体。其中, 茫崖、油墩子、昆特依、察汗斯拉图、油泉子、油砂山等地卤水成因为溶滤盐岩卤水; 南翼山地区水化学异常,  $Ca^{2+}$ 、 $Cl^-$  含量最高, 卤水成因与深部  $CaCl_2$  型水有关; 开特米里克地区卤水由于地表风化作用的影响来源于地表大气降水溶蚀露头区盐类矿物水和深部水的混合水体。从卤水聚类 and 因子分析认为, 柴达木盆地西部卤水大部分卤水具有深源的特征, 说明卤水在迁移途中, 溶滤了周围的岩盐, 具有高的矿化度, 后期有地表水体掺合。从  $C_{Na}/C_{Cl}$  值可以推测卤水淋滤的岩盐主要为石盐矿物,  $K^+$ 、 $Br^-$  的较高含量反映溶滤的岩盐形成时的原始卤水浓缩程度较高, 能达到钾盐或更为晚期的盐类矿物析出阶段或有大量深部富钾水体的补给。并且从判别蒸发沉积阶段的重要的地球化学标志  $K/Br$ 、 $K \times 10^3/Cl$  值看, 南翼山地区卤水中  $K^+$  含量较高, 卤水的  $K^+$  折合成  $KCl$  已达 5.43%, 远超出开采卤水的  $KCl$  工业品位标准, 具有潜在的资源意义。因此, 南翼山地区是我们目前寻找钾盐矿(富钾卤水)最有前景的区域之一;

(3) 柴达木盆地西部岩盐分布广、厚度大, 地表有卤水出露的岩盐仅占其一小部分, 以期今后通过元素和同位素地球化学特征来判断岩盐出露区是否达到钾盐沉积的晚期阶段以及卤水地球化学分异特征, 从而为蒸发岩(尤其是盐湖钾盐)沉积提供一些理论依据。

致谢 野外工作得到高章洪研究员悉心的指导和帮助; 冉广芬实验师完成了测试数据的分析、校核、复查工作; 在此表示真诚的感谢!

### 参考文献

陈郁华, 译. 1972. 国外钾盐矿床普查资料(专辑), 地质科学院情报研究所编. 32~48.

党玉棋, 尹成明, 赵东升. 2004. 柴达木盆地西部地区古近纪与新近纪沉积相. 古地理学报, 6(3): 297~306.

付建龙, 于升松, 李世金, 等. 2005. 柴达木盆地西部第三系油田卤水资源可利用性分析. 盐湖研究, 13(3): 17~21.

郭泽清, 刘卫红, 李本竞, 等. 2005. 柴达木盆地西部埋藏史分析与油气关系类型. 地球学报, 26(5): 465~471.

蒋少涌. 2000. 硼同位素及其地质应用研究. 高校地质学报, 6(1):

1~16.

金强, 查明. 2000. 柴达木盆地西部第三系蒸发岩与生油岩共生沉积作用研究. 地质科学, 28(4): 465~473.

林耀庭, 颜仰基, 吴应林. 1997. 四川盆地西部富钾富矿卤水的发现及其地球化学特征和意义. 地质地球化学, 3(3): 31~39.

林耀庭, 唐庆, 熊淑君. 1999. 四川盆地海相三叠系异常水化学探盐找钾的研究. 化工矿产地质, 21(1): 7~14.

林耀庭, 何金权, 王田丁, 等. 2002. 四川盆地中三叠统成都盐盆富钾卤水地球化学特征及其勘查开发前景研究. 化工矿产地质, 24(2): 72~84.

刘兴起, 蔡克勤, 于升松. 2002. 柴达木盆地形成演化与水体来源关系的地球化学初步模拟: Pitzer 模型的应用. 地球化学, 31(5): 501~507.

钱自强, 曲一华, 刘群. 1994. 钾盐矿床. 北京: 地质出版社, 148~243.

青海省地质调查院. 2003. 青海省柴达木盆地西部第三系富钾硼锂碘油田水资源远景区评价. 西宁: 青海省地质调查院, 20~40.

谭红兵, 马万栋, 马海州, 等. 2004. 塔里木盆地古盐矿点卤水水化学特征与找钾研究. 地球化学, 33(2): 152~158.

瓦良亚什科. 1965. 钾盐矿床形成的地球化学规律. 范立. 北京: 中国工业出版社, 30~57.

王增银, 刘娟, 王涛, 等. 2003. 镭元素地球化学在水文地质研究中的应用进展. 地质科技情报, 22(4): 91~95.

王弼力, 杨智琛, 刘成林, 等. 1996. 柴达木盆地北部盐湖钾矿床及其开发前景. 北京: 地质出版社, 33~51.

肖荣阁, 大井隆夫, 蔡克勤, 等. 1999. 硼及硼同位素地球化学在地质研究中的应用. 地学前缘, 6(2): 361~368.

袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 1983. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析. 地质论评, 29(2): 159~165.

袁见齐, 杨谦, 孙大鹏, 等. 1995. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件. 北京: 地质出版社, 158~166.

袁见齐. 1975. 钾肥与钾盐矿床. 北京: 燃料化学工业出版社, 100~101.

曾昭华, 曾雪萍. 2001. 地下水中溴的形成及其与人群健康的关系. 吉林地质, 20(1): 57~60.

张彭熹, 等著. 1987. 柴达木盆地盐湖. 科学出版社, 32~233.

张彭熹, 张保珍, T·K Lowenstein, 等. 1991. 论述古代异常钾盐蒸发岩的成因——来自柴达木盆地的佐证. 地球化学, (2): 134~143.

张西营, 马海州, 谭红兵. 2002. Sr 的地球化学指示意义及其在盐湖研究. 盐湖研究, 10(3): 38~44.

郑绵平. 2001. 青藏高原盐湖研究的新进展. 地球学报, 22(2): 97~102.

郑喜玉. 1986. 柴达木盆地盐湖 Li、B 地球化学. 中国科学院盐湖所编. 青海柴达木盆地晚新生代地质环境演化. 北京: 科学出版社, 133~147.

中国科学院青海盐湖研究所分析室编著. 1988. 卤水和盐的分析方法. 北京: 科学出版社, 29~237.

中华人民共和国地质矿产行业标准: DZ/T0212-2002. 2003. 盐湖和盐类矿产地质勘查规范. 中华人民共和国国土资源部发布. 北

京:地质出版社.

## References

- Analysis lab of Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences. 1988. Analysis Methods of Br<sup>-</sup> ions and Salt. Beijing: Science Press, 29 ~ 237.
- Chen Yuhua. 1972. Investigating reference of potash deposit from foreign countries. Institute of information, Academy of Geological Sciences (in Chinese).
- Dang Yuqi, Yin Chengming, Zhao Dongsheng. 2004. Sedimentary facies of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin. *Journal of Palaeogeography*, 6(3): 297 ~ 306 (in Chinese with English abstract).
- FU Jianlong, YU Shengsong, LI Shijin, et al. 2005. Availability of Tertiary Oil field Water Resources in western Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 13(3): 17 ~ 21 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zeqing, Liu Weihong, Li Benjing, et al. 2005. An analysis of the burial history of western Qaidam Basin in relation to oil-gas accumulation. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(5): 465 ~ 471 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Shaoyong. 2000. Boron isotope and its geological application. *Geol. J. China Univ.*, 6(1): 1 ~ 16 (in Chinese with English abstract).
- Jing Qiang, zha Ming. 2000. Co-Sedimentation of tertiary evaporites and oil source rocks in the western Qaidam Basin. *Scientia Geologica Sinica*, 28(4): 465 ~ 473 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting, He Jinqun, Wang Tianding, et al. 2002. Geochemical characteristics of Potassium-rich brine in middle Triassic Chengdu salt basin of Sichuan Basin and its prospects for brine tapping. *Geol Chem Mineral*, 24(2): 72 ~ 84 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting, Tang Qing, Xiong Shujun. 1999. Application of hydrochemical anomaly to locating salt and potassium resources in marine triassic sequence in SiChuan Basin. *Geology of Chemical Minerals*, 21(1): 7 ~ 14 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting, Yan Yangji, Wu Yinglin. 1997. Discovery of potassium-rich and high-grade brines in western SiChuan Basin; Geochemistry and Significance. *Geology-Geochemistry*, 3(3): 31 ~ 39 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xingqi, Cai Keqin, Yu Shengsong. 2002. Geochemical simulation of formation and evolution of salt lakes and their water sources in Qaidam Basin; Application of Pitzer's model. *Geochimica*, 31(5): 501 ~ 507.
- Qian Ziqiang, Qu Yihua, Liu Qun. 1994. Potash Deposit. Beijing: Geological Publishing House, 148 ~ 243 (in Chinese).
- Qinghai geological investigating bureau. 2003. Evaluation of oil field brines resources of Tertiary in western Qaidam Basin. Xining: Qinghai Geological Investigating Bureau (in Chinese).
- Tan Hongbing, Ma Wandong, Ma Haizhou, et al. 2004. Hydrochemical characteristics of brines and application to locating potassium in western Tarim Basin. *Geochimica*, 33(2): 152 ~ 158 (in Chinese with English abstract).
- The standard of Geology and Mineral industry in China: DZ/TD212-2002. 2003. Specifications for salt-lake, salt mineral exploration, Chinese department of land and resource publication. Beijing: Geological Publishing House, 3.
- Waliyahik. 1965. Geochemical laws of the formation of potash deposits. Fanli. Beijing: China Industry Press, 30 ~ 57 (in Chinese).
- Wang Zengying, Liu Juan, Wang Tao, et al. 2003. Application advances of Strontium geochemistry in hydrogeology research. *Geological Science and Technology Information*, 22(4): 91 ~ 95 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mili, Yang Zhichen, Liu Chenglin, et al. 1996. Potash deposits and their exploitation prospects of saline lakes of the northern Qaidam Basin. Beijing: Geological Publishing, 33 ~ 51 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Rongge, Da Jinglongfu, Cai Keqin, et al. 1999. Application of boron and boron isotope geochemistry in the study of geological process. *Earth Sci. Front*, 6(2): 361 ~ 368 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianqi, Hu Chengyu, Cai Keqin. 1983. Analysis of a new forming halite model Forming halite environment of high mountain and deep basin. *Geological Review*, 29(2): 159 ~ 165 (in Chinese).
- Yuan Jianqi, Yang Qian, Sun Dapeng, et al. 1995. The formation conditions of the potash deposits in CharHan Saline Lake, Qaidam Basin, China. Beijing: Geological Publishing House, 158 ~ 166 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianqi. 1975. Potassium fertilizer and potassium salt deposit. Beijing: Fuel and Chemistry Industry Publishing House, 100 ~ 101 (in Chinese).
- Zeng Zhaohua, Zeng Xueping. 2001. The formation of trace element of Br<sup>-</sup> in groundwater and its relationship with the health of people's community. *JinLin Geology*, 20(1): 57 ~ 60 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Pengxi, et al. 1987. Salt Lake of Qaidam Basin. Beijing: Scientific Publishing House, 32 ~ 233 (in Chinese).
- Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, T. K Lowenstein, et al. 1991. On the origin of ancient anomalous evaporites: Evidence from Qaidam Basin. *Geochimica*, 2: 134 ~ 143 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiyi, Ma Haizhou, Tan Hongbing. 2002. The Indicative significance and application of Strontium in Geochemistry. *Journal of Salt Lake Research*, 10(3): 38 ~ 44 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping. 2001. Study advances in saline lake resources on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(2): 97 ~ 102 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Xiyu. Li and B salt lake geochemistry in the Qaidam Basin. 1986. Paleocenezoic geological environmental evolvment of Qaidam Basin in the QingHai. Beijing: Scientific Publishing House, 133 ~ 147 (in Chinese).