矿物岩石地球化学通报
Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry
Vol. 28 No. 2, Apr. 2009

柴达木盆地西部油田卤水的硫同位素地球化学特征

樊启顺[1,2],马海州[1],谭红兵[3],李廷伟[1]

1. 中国科学院 青海盐湖研究所 中国科学院盐湖资源与化学重点实验室,西宁 810008;2. 中国科学院研究生院,北京 100049;3. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210098

摘 要:柴达木盆地西部赋存于古近系-新近系、第四系地层的9件卤水样品的稳定硫同位素比值和水化学组成分析发现,油田卤水相对于地表浅层卤水富Ca^{2+},贫Mg^{2+}、SO_4^{2-},具$CaCl_2$型卤水特征。结合$\delta^{34}S$值和SO_4^{2-}含量,表明浅层卤水的硫同位素比值与盐湖水化学类型和硫酸根离子含量有关。硫酸盐型的盐湖中,卤水的硫同位素比值与硫酸根离子含量呈正比;氯化物型的盐湖中,浅层卤水的硫同位素比值较低,且低于硫酸盐型的盐湖卤水。对深部油田卤水而言,有明显偏正的硫同位素比值,说明受到有烃类参加的高温还原作用或者微生物(细菌)还原作用的影响,富集硫同位素。正是由于硫酸盐的还原作用,卤水的化学演化过程中改变了卤水的水化学性质,沉积了大量的氯化物型卤水,为液体钾盐矿床的形成奠定了基础。

关 键 词:柴达木盆地西部;油田卤水;硫同位素特征

中图分类号:P618.13 **文献标识码**:A **文章编号**:1007-2802(2009)02-0137-06

Geochemistry Characteristics of Sulfur Isotope in Oilfield Brine of the Western Qaidam Basin

FAN Qi-shun[1,2], MA Hai-zhou[1], TAN Hong-bing[3], LI Ting-wei[1]

1. *Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Salt Lake Resources and Chemistry, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining* 810008, *China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*

Abstract: This study analyzed aquatic chemistry and stable sulfur isotope composition for 9 brine samples collected from Tertiary and Quaternary strata of the western Qaidam basin. It was found that oilfield brine samples enriched Ca^{2+}, depleted Mg^{2+}、SO_4^{2-}, and presented the characteristics of $CaCl_2$ type brine, and that the $\delta^{34}S$ values of brine correlated with the aquatic chemistry type and SO_4^{2-} content of salt lakes. In the sulfate type salt lake, $\delta^{34}S$ values of brine positively correlated with the SO_4^{2-} content. In the chloride type salt lake, $\delta^{34}S$ values of brine were lower than those of the sulfate type salt lake. The oilfield brine had obviously positive $\delta^{34}S$ values (ranging from 26.46‰ to 54.57‰) compared with those of the salt lake brine, indicating the effects of the hydrocarbon involving reduction process or the microbiologic reduction process. It is the reduction process of sulfate that changed the aquatic chemistry characteristics of brine during its evolution to deposit a large amount of the chloride type brine. This process is the fundamental step of forming liquid potash ores in China.

Key words: the western Qadiam basin; oilfield brine; sulfur isotope characteristics

收稿日期:2008-11-12 收到,12-15 改回
基金项目:中国科学院重大基础研究前期研究项目(2004CCA03500)
第一作者简介:樊启顺(1980—),男,在读博士生,地球化学专业. E-mail: fanqishun100@163.com.

柴达木盆地的盐湖不仅有着丰富的盐类沉积,还有大量的卤水资源,是研究盆地盐类矿物、卤水同位素地球化学特征的天然实验室。在近十几年来,众多学者对盐湖卤水和盐类矿物 Cl、B、Li、Sr、H、O 同位素地球化学已作过一些工作[1~13],为搞清盐湖卤水演化、岩盐地球化学特征提供了理论依据。但是对盆地周围赋存的油田卤水、深部地热水、盐泉水,以及不同类型盐湖卤水-硫酸盐类矿物硫同位素的研究较少。基于此,我们于 2006 年在考察柴达木盆地西部盐湖和盐矿点时(图 1),采集了 9 件卤水样品(湖表卤水、晶间卤水和油田卤水),结合前人的研究成果,分析对比了地表浅层卤水、深部油田卤水、古近系 - 新近系硫酸盐矿物(石膏)硫同位素地球化学组成,提出该区油田卤水硫同位素的地球化学规律。

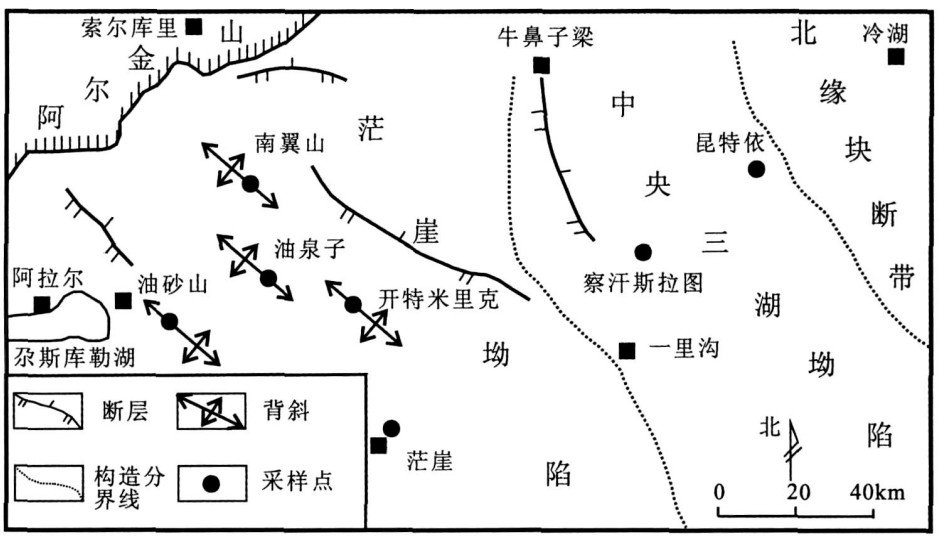


图 1 柴达木盆地西部主要构造单元及采样位置图

Fig. 1 Distribution map of the main tectonic units and sample locations in the western Qaidam Basin

1 区域地质背景及样品分析

柴达木盆地四周被昆仑山、阿尔金山和祁连山所包围,呈不规则菱形区带。盆地东西长 850 km,南北宽 150～300 km,面积约 12.1 ×10^4 km^2。柴达木地块在海西运动以前是横贯欧亚大陆南部的古特提斯海的组成部分,海西运动以来,经历了多次造山运动,每次造山运动不仅使地块脱离海相环境,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,中央坳陷盆地逐渐形成"边断内超、高山深盆"的沉积环境[14],为盆地带来了大量的盐类与碎屑物质。干旱封闭的气候环境,加剧了成盐作用的强度,沉积了厚层的盐层[10]。盆地内部受特提斯洋中 - 新生代周期性俯冲消减和闭合作用及印度板块与欧亚板块最终碰撞、向北楔入的远程效应的控制,昆仑山和祁连山对柴达木盆地产生强烈的挤压作用,阿尔金山也有明显的挤压作用。因此,在三大山系的山前地区发育了一系列的逆冲断层和断展背斜[15]。盆地西部在区域构造位置上属被深大断裂分割的 3 个一级构造单元的茫崖坳陷。油田卤水分布区主要为该坳陷内一系列皱褶变形而形成的北西西向背斜构造,主要有南翼山、油泉子、开特米里克和油砂山等。

油田卤水赋存于构造皱褶系统的各背斜构造部位,地貌上表现为低山、丘陵区,含水层主要为微胶结的碎屑岩和灰岩。透水性弱,水头压力高,与石油、天然气共生,为高矿化度盐卤水。根据部分石油钻孔记录资料或测井资料,油田水的赋存地层主要为上新统狮子沟组、上油砂山组、中新统下油砂山组、上干柴沟组及渐新统下干柴沟组[16]。

样品采自石油钻孔,自北而南分别采集了南翼山、油泉子、开特米里克、油砂山构造单元钻孔喷出的古近系-新近系油田卤水;同时采集了茫崖东部一些小盐湖、昆特依盐湖卤水。每件卤水样品为 500 mL,现场测比重后封口备用。常量成分 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、CO_3^{2-} 采用常规重量法(误差 ±0.5 %)和滴定法(误差 0.2 %～0.3 %)测定(表 1)。

表 1 柴达木盆地西部卤水水化学分析结果

Table 1 Aquatic chemistry data of brine from the western Qaidam Basin

序号	样号	采样类型	K^+/g·L^{-1}	Na^+/g·L^{-1}	Ca^{2+}/g·L^{-1}	Mg^{2+}/g·L^{-1}	SO_4^{2-}/g·L^{-1}	HCO_3^-/g·L^{-1}	Cl^-/g·L^{-1}	TDS/g·L^{-1}
1	MYD-01	湖表卤水	3.79	111.53	0.61	7.83	15.0	0.72	187.2	326.9
2	MYD-02	湖表卤水	3.76	111.45	0.55	7.97	15.1	0.75	187.3	327.1
3	KTY-01	晶间卤水	12.36	108.18	0.41	13.91	60.2	0.18	175.0	370.3
4	KTY-02	晶间卤水	10.89	106.72	0.29	13.58	48.3	0.20	178.8	358.7
5	YSS-01	油田卤水	0.30	68.48	6.51	1.30	0.57	0.07	120.0	197.8
6	NYS-01	油田卤水	37.50	15.04	118.0	7.78	0.16	——	297.2	485.7
7	CHSLT-01	油田卤水	2.07	113.75	6.74	2.25	1.31	0.25	192.5	319.8
8	YQZ-01	油田卤水	0.78	167.05	13.58	2.06	0.13	0.01	176.2	379.0
9	KTMLK	油田卤水	0.18	124.27	2.25	1.68	4.08	0.35	81.4	214.6

注:1～2. 茫崖湖表卤水(第四系);3～4. 昆特依晶间卤水(第四系);5. 油砂山油田卤水(古近系,埋深 1000 m);6. 南翼山油田卤水(古近系,埋深 1000～1500 m);7. 察汗斯拉图油田卤水(新近系,埋深 500 m);8. 油泉子油田卤水(新近系,埋深 500～1000 m);9. 开特米里克油田卤水(新近系,埋深 500 m)。埋深和产出层位引自文献[16]

2 油田卤水 $\delta^{34}S$ 同位素组成

稳定硫同位素在国土资源部中南矿产资源监督检测中心,采用 MAT251 气体同位素质谱仪测定,分析误差 ≤0.3‰。

油田卤水是指柴达木盆地西部古近系 - 新近系地层内赋存的高矿化度的卤水。从 2000 年开始,一些单位对其进行了考察研究,发现盆地西部背斜构造区有丰富的油田卤水资源,富含 B、Li、Sr、Br、I 等元素[17～20],有望成为柴达木盆地液体矿床的储备资源。2007 年以来,有关部门高度重视这一资源,列为科技攻关项目,以满足钾肥生产的需求。元素水化学分析表明,这些油田卤水均具典型的 $CaCl_2$ 型卤水特征,富集 Ca^{2+} 而耗 Mg^{2+}、SO_4^{2-},并与柴达木盆地察尔汗盐湖北部补给的深部水体、昆特依盐湖、冷湖等油田卤水有相似的地球化学特征。有学者分析了柴达木盆地北部河湖水和油田卤水、西部的天青石和狮子沟钻井中硫酸盐矿物的硫同位素[8,21]。但都是用卤水或者硫酸盐矿物来分析硫同位素,没有概括探讨柴达木盆地卤水-硫酸盐矿物中硫同位素的变化规律,尤其是盆地西部油田卤水。

柴达木盆地西部卤水硫同位素值及部分水体硫酸根离子含量见表 2。从表可见,盆地中淡水硫同位素值最低,为 7.20‰[8],与北方大气降水硫同位素平均值(7.44‰[22])接近。硫酸盐型盐湖湖表卤水硫同位素平均值为 11.47‰;晶间卤水硫同位素平均值为 18.53‰。湖表卤水的硫同位素值低于晶间卤水,湖表卤水的硫酸根离子含量也明显低于晶间卤水,说明卤水的硫同位素值与水体中的硫酸根离子含量呈正比。氯化物型盐湖卤水的硫同位素平均值为 10.45‰,明显低于硫酸盐型盐湖卤水,说明演化的晚期阶段盐湖硫同位素值较低,海相成因的卤水和硫酸盐类矿物中也有类似的变化[23]。氯化物型盐湖的浅层卤水硫同位素平均值为 10.45‰;深部油田卤水硫同位素值为 26.46‰～54.57‰,平均为 40.41‰。一般认为,影响硫同位素变化的因素主要是物质来源和还原作用。尽管水化学类型相似,不同的地质背景和物质来源湖水硫同位素值差异较大;而同一地区物质来源相同的湖水,硫酸盐的还原作用不同也会导致硫同位素值的差异。不同地点的油田卤水 H、O 同位素分析表明,油田卤水具有与大气降水一致的 δD 值,初步判断这些水体最初来自于大气降水[13],但与大气水水化学类型不同,具明显偏正的硫同位素比值,说明物源相同的水体在迁移过程中受到细菌还原作用的影响。证据有三:1)柴达木盆地西部油田卤水是埋藏于古近系 - 新近系地层中的深部卤水(埋深为 500～1500 m)[16],在封闭体系的还原条件下,地层中硫酸盐发生明显分馏,富集重硫同位素[24];2)古近系 - 新近系作为盆地内主要的生油层,烃类充填后,热化学硫酸盐还原作用强烈,可生成 H_2S 气体[25],野外采样时,可闻到油田钻孔中有刺鼻、臭鸡蛋气味;3)与烃类关系密切的油田水,在原油降解时,发生烃 - 水反应,使 δD 值降低[26]; H_2S 氧化和电离提供 H^+,促进水-岩作用加剧,导致 $\delta^{18}O$ 值明显正偏移[25],这在 H、O 同位素数据[13]中得到证实:硫酸盐的还原作用能富集重硫同位素。

柴达木盆地西部的油田卤水富集硫同位素值,说明在迁移过程中肯定受到了还原作用的影响。我们对比了柴达木盆地西部油田卤水、盐湖卤水、固体

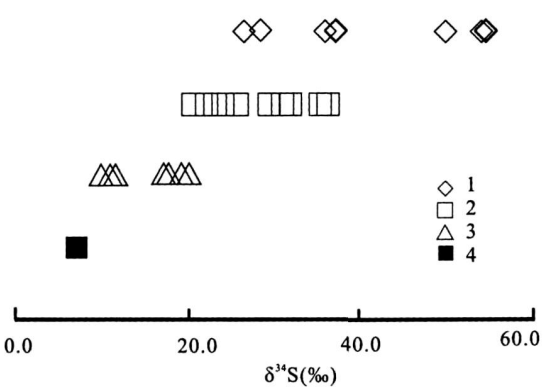
表 2 柴达木盆地西部卤水硫同位素组成

Table 2 Sulfur isotope compositions of brine from the western Qaidam Basin

采样地点	采样类型	水化学类型	SO_4^{2-} / mg·L^{-1}	$\delta^{34}S$(‰)
昆特依北部阿尔金山*	潜淡水	—		7.20
茫崖	湖表卤水	硫酸镁亚型	15020	11.39
茫崖	湖表卤水	硫酸镁亚型	15100	11.55
昆特依	晶间卤水	硫酸镁亚型	48300	17.30
昆特依	晶间卤水	硫酸镁亚型	60200	17.63
昆特依*	晶间卤水	硫酸镁亚型		19.30
昆特依*	晶间卤水	硫酸镁亚型		19.90
双气泉*	潜卤水	氯化物型		10.00
昆特依北部*	浅层卤水	氯化物型		10.90
冷湖 Ⅳ 号*	油田卤水	氯化物型		28.40
南翼山	油田卤水	氯化物型	158	26.46
油泉子	油田卤水	氯化物型	134	35.99
油砂山	油田卤水	氯化物型	570	36.95
油砂山	油田卤水	氯化物型	570	37.23
察汗斯拉图	油田卤水	氯化物型	1310	54.57
开特米里克	油田卤水	氯化物型	4080	49.73

注:采样地点标有 *的数据来自文献[8];其余数据来自本文

硫酸盐矿物、淡水的硫同位素值(图 2)。这些赋存在古近系 - 新近系地层中的油田卤水具有与地层硫酸盐矿物相似的硫同位素值,我们在狮子沟 25 井钻孔沉积物中,发现了黄铁矿晶体[22]。说明硫酸盐的还原作用使油田卤水-硫酸盐体系硫同位素值都偏



1. 油田卤水;2. 硫酸盐矿物(天青石和石膏数据分别来自文献[19],[22]);3. 盐湖卤水 (文献[8]);4. 淡水(文献[8])

图 2 柴达木盆地西部不同水体和硫酸盐矿物硫同位素组成

Fig. 2 $\delta^{34}S$ of different waters and solid halites in the western Qaidam Basin

正。不同地点的油田卤水硫同位素值都不一样,其中南翼山、冷湖、油泉子、油砂山的硫同位素与地层硫酸盐矿物的硫同位素值相同;察汗斯拉图、开特米里克油田卤水的硫同位素值和硫酸根离子含量更高。如按硫酸盐的还原作用分析,两处的油田卤水更应该贫 SO_4^{2-}。这与实测值相反,说明或许察汗斯拉图、开特米里克的油田卤水有地表水混合,使水中 SO_4^{2-} 含量增加,这得到 H、O、Sr 同位素数据的证实(另文讨论)。因此,如果水体的物质来源相同,$\delta^{34}S$ 增加而 SO_4^{2-} 含量减少,说明水体受到硫酸盐还原作用的影响;$\delta^{34}S$ 和 SO_4^{2-} 含量均增加,说明水体受地表水体的混合。

地表水体带入更多的细菌,加强了还原作用,导致偏正的硫同位素值。这个结论与不同地点油田卤水埋深相符。如南翼山、油泉子、油砂山油田卤水的埋藏较深(1000～1500 m),很难受到地表水或者浅层水的影响;而开特米里克和察汗斯拉图油田卤水的埋藏较浅(500 m 左右),比较容易受到沿断裂下渗的浅层水体的干扰。所以,盆地西部油田卤水中,$\delta^{34}S$ 和 SO_4^{2-} 含量以和埋深的对应关系能够判断水体的物质来源。

此外,不同地点油田卤水的 $\delta^{34}S$ 值与埋深呈反比:埋藏越深,$\delta^{34}S$ 值越小;埋藏越浅,$\delta^{34}S$ 值越大。蔡春芳[27]认为还原作用包括热化学硫酸盐还原作用和微生物(细菌)硫酸盐还原作用。埋藏较深的地层由于温度较高,不适合微生物的生长,硫酸盐的还原作用一般有烃类参与的热化学还原作用;而埋藏较浅的地层,可能受热化学还原作用和微生物还原作用的双重影响,这是导致开特米里克和察汗斯拉图油田卤水明显偏正的主要原因。

3 热化学和微生物(细菌)还原作用的意义

袁见齐等人[28]研究察尔汗盐湖钾盐矿床形成条件时,发现盐湖北侧沿断裂带富集 Ca^{2+}、Cl^-,为 $CaCl_2$ 型的卤水。正是这种卤水与来自南部硫酸盐型河湖水的掺杂作用,改变了卤水的水化学性质,沉积了中国最大的内陆液体钾盐矿床。之后,多数学者把这种水体归结为深部水体,但没有分析深部的 $CaCl_2$ 型的卤水富 Ca^{2+} 而耗 Mg^{2+}、SO_4^{2-} 的原因。然而,在盆地周围油田卤水的水化学特征与柴达木盆地西部油田卤水很相近,说明地层深处同样受硫酸盐还原作用的影响。正是由于硫酸盐的还原作用,卤水在化学演化过程中改变了水化学性质,从富含 SO_4^{2-} 的硫酸盐型卤水演化成贫 SO_4^{2-} 的氯化物型卤水,沉积了大量氯化物型的卤水,为中国液体钾

盐矿床的形成奠定了基础。

4 结 论

(1) 硫酸盐型盐湖卤水的硫同位素值与硫酸根离子含量呈正比;在氯化物型盐湖卤水的硫同位素值低于硫酸盐型盐湖卤水,说明演化到晚期阶段的盐湖具有较低的硫同位素比值。

(2) 古近系 - 新近系地层中的硫酸盐矿物与深部油田卤水一样,硫同位素值明显偏正,说明受有烃类参加的高温强烈还原作用或者细菌还原作用的影响,富集硫同位素。物质来源相同的水体,$\delta^{34}S$ 增加而 SO_4^{2-} 离子含量减小,说明水体受到硫酸盐还原作用的影响;$\delta^{34}S$ 与 SO_4^{2-} 离子含量都增加,说明水体有地表水混合。

(3) 硫酸盐的还原作用,改变了卤水的水化学性质,生成了大量的氯化物型的卤水。

参考文献 (References) :

[1] 肖应凯, 金琳, 刘卫国, 祁海平, 王蕴慧, 孙大鹏. 大柴达木湖的氯同位素组成[J]. 科学通报, 1994, 39 (14): 1319 - 1322.
Xiao Yingkai, Jin Lin, Liu Weiguo, Qi Haiping, Wang Yunhui, Sun Dapeng. Chlorine isotopic composition in Da Qaidam Lake[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(14): 1319 - 1322. (in Chinese)

[2] 刘卫国, 肖应凯, 孙大鹏, 祁海平, 王蕴慧. 柴达木盆地氯同位素组成特征[J]. 地球化学, 1996, 25(3): 296 - 303.
Liu Weiguo, Xiao Yingkai, Sun Dapeng, Qi Haiping, Wang Yunhui. Chlorine isotopic composition in Qaidam Basin[J]. Geochimica, 1996, 25(3): 296 - 303. (in Chinese with English abstract)

[3] 肖应凯, 刘卫国, 周引民, 孙大鹏. 盐湖卤水及盐类矿物的氯同位素组成[J]. 科学通报, 1996, 41(22): 2067 - 2070.
Xiao Yingkai, Liu Weiguo, Zhou Yinmin, Sun Dapeng. Chlorine isotopic composition for brines and salt deposits of salt lake[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(22): 2067 - 2070. (in Chinese)

[4] 孙大鹏, 帅开业, 高建华, 刘卫国, 周引民, 马育华. 氯化物型钾盐矿床氯同位素地球化学的初步研究[J]. 现代地质, 1998, 12(2): 229 - 234.
Sun Dapeng, Shuai Kaiye, Gao Jianhua, Liu Weiguo, Zhou Yinmin, Ma Yuhua. A preliminary investigation on stable isotopic ceochemistry of chlorine for the potash deposits of chloride-type[J]. Geoscience, 1998, 12(2): 229 - 234. (in Chinese with English abstract)

[5] 李俊周, 孙大鹏. 大柴达木盐湖硼同位素地球化学研究[J]. 地球化学, 1996, 25(3): 277 - 285.
Li Junzhou, Sun Dapeng. Boron isotopic geochemistry of Da Qaidam salt lake, Qaidam Basin, China[J]. Geochimica, 1996, 25(3): 277 - 285. (in Chinese with English abstract)

[6] 肖应凯, Shirodkar P V, 刘卫国, 王蕴慧, 金琳. 青海柴达木盆地盐湖硼同位素地球化学研究[J]. 自然科学进展, 1999, 9(7): 612 - 618.
Xiao Yingkai, Shirodkar P V, Liu Weiguo, Wang Yunhui, Jin Lin. Boron isotopic geochemistry of salt lake in Qaidam basin, Qinghai[J]. Natural Science Advance, 1999, 9(7): 612 - 618. (in Chinese with English abstract)

[7] 肖应凯, 祁海平, 王蕴慧, 金琳. 青海大柴达木湖卤水、沉积物和水源水中的锂同位素组成[J]. 地球化学, 1994, 23(4): 329 - 339.
Xiao Yingkai, Qi Haiping, Wang Yunhui, Jin Lin. Lithium isotopic compositions of brine, sediments and source water in Da Qaidam Lake, Qinghai, China[J]. Geochimica, 1994, 23(4): 329 - 339. (in Chinese with English abstract)

[8] 王弭力, 杨智琛, 刘成林, 谢志超, 焦鹏程, 李长华. 柴达木盆地北部盐湖钾矿床及其开发前景[M]. 北京:地质出版社, 1997: 33 - 51.
Wang Mili, Yang Zhichen, Liu Chenglin, Xie Zhichao, Jiao Pengcheng, Li Changhua. Potash deposits and their exploitation prospects of saline lakes of the northern Qaidam Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 33 - 51. (in Chinese)

[9] 李廷伟, 谭红兵, 樊启顺. 柴达木盆地西部卤水水化学特征及成因分析[A]. 陈毓川, 毛景文, 薛春纪. 第八届全国矿床会议论文集[C]. 北京: 地质出版社, 2006, 488 - 491.
Li Tingwei, Tan Hongbing, Fan Qishun. The brines' characteristic and cause of formation in western Qaidam Basin[A]. Chen Yuchuan, Mao Jingwen, Xue Chunji. The Eighth National Mineral Deposit Meeting Transactions[C]. Beijing: Geological Publishing House, 2006:488 - 491. (in Chinese)

[10] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京:科学出版社, 1987:32 - 233.
Zhang Pengxi. Salt Lake of Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press, 1987:32 - 233. (in Chinese)

[11] 张保珍, 范海波, 张彭熹, Lowenstein T K, Spencer R J. 察尔汗盐湖石盐的流质包裹体氢氧稳定同位素分析及其地球化学意义[J]. 沉积学报, 1990, 8(1): 3 - 17.
Zhang Baozhen, Fan Haibo, Zhang Pengxi, Lowenstein T. K, Spencer R.J. Hydrogen and oxygen stable isotope analyses of fluid inclusions in halite in Chaehan salt lake with geochemical implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(1): 3 - 17. (in Chinese with English abstract)

[12] 张彭熹, 张保珍, Lowenstein T K, Spencer R J. 试论古代异常钾盐蒸发岩的成因 ——来自柴达木盆地的佐证[J]. 地球化学, 1991, 6(2): 134 - 144.
Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, Lowenstein T K, Spencer R J. On the origin of ancient anomalous evaporates: Evidence form Qaidam Basin[J]. Geochimica, 1991, 6(2): 134 - 144. (in Chinese with English abstract)

[13] 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 许建新, 李廷伟. 柴达木盆地西部

卤水特征及成因[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 601 - 611.
Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbing, Xu Jianxin, Li Tingwei. Origin and characteristics of brines in the western Qaidam Basin[J]. Geochimica, 2007, 36(6): 601 - 611. (in Chinese with English abstract)

[14] 袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析[J]. 地质论评, 1983, 29(2): 159 - 165.
Yuan Jianqi, Huo Chengyu, Cai Keqin. Analysis of a new forming halite model — Forming halite environment of high mountain and deep basin[J]. Geological Review, 1983, 29(2): 159 - 165. (in Chinese)

[15] 姜波, 徐凤银, 彭德华, 周建勋, 金法礼. 柴达木盆地北缘断裂构造变形特征[J]. 中国矿业大学学报, 33(6): 687 - 692.
Jiang Bo, Xu Fengyin, Peng Dehua, Zhou Jianxun, Jin Fali. Deformation characteristics of fault structures on the northern fringe of Qaidam Basin[J]. Journal of China University of Mining &Technology, 2004, 33(6): 687 - 692. (in Chinese with English abstract)

[16] 谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 樊启顺. 柴达木盆地古近系和新近系油田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.
Tan Hongbing, Cao Chengdong, Li Tingwei, Fan Qishun. Hydrochemistry characteristics and chemical evolution of oilfield brines of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(3): 313 - 320. (in Chinese with English abstract)

[17] 付建龙, 于升松, 李世金, 任海燕. 柴达木盆地西部第三系油田卤水资源可利用性分析[J]. 盐湖研究, 2005, 13(3): 17 - 22.
Fu Jianlong, Yu Shengsong, Li Shijin, Ren Haiyan. Availability of Tertiary Oil field Water Resources in western Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2005, 13(3): 17 - 21. (in Chinese with English abstract)

[18] 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 李廷伟. 柴达木盆地西部典型地区油田卤水的水化学异常和资源评价[J]. 盐湖研究, 2007, 15: 6 - 12.
Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbing, Li Tingwei. Hydrochemical anomaly and resources evaluation of the oilfield brines in the typical area of western Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2007, 15: 6 - 12. (in Chinese with English abstract)

[19] 葛文胜, 蔡克勤. 柴达木盆地西北部锶矿成矿系统研究[J]. 现代地质, 2001, 15: 53 - 58.
Ge Wensheng, Cai Keqin. Mineralization system of celestite deposits in Northeastern Qaidam Basin[J]. Geoscience, 2001, 15(1): 53 - 59. (in Chinese with English abstract)

[20] 葛文胜, 蔡克勤. 柴达木盆地富锶卤水的特征及成因[A]. 陈毓川, 毛景文, 薛春纪. 第八届全国矿床会议论文集[C]. 北京: 地质出版社, 2006: 327 - 331.
Ge Wensheng, Cai Keqin. Origin and characteristics of rich strontium brines in Qaidam Basin[A]. Chen Yuchuan, Mao Jingwen, Xue Chunji. Proceedings of the Eighth National Mineral Deposit Meeting[C]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 327 - 331. (in Chinese)

[21] 彭立才, 杨萍, 濮人龙. 陆相咸化湖泊沉积硫酸岩硫同位素组成及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 4(2): 99 - 102.
Peng Licai, Yang Ping, Pu Renlong. The sulfur lsotope composition of sulfate rock deposited in continental brackish lakes and its geological significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1999, 4(2): 99 - 102. (in Chinese with English abstract)

[22] 洪业汤, 张鸿斌, 朱永煊, 朴河春, 姜洪波, 刘德平. 中国大气降水的硫同位素组成特征[J]. 自然科学进展, 1994, 4(6): 741 - 745.
Hong Yetang, Zhang Hongbin, Zhu Yongxuan, Piao Hechun, Jiang Hongbo, Liu Deping. Sulfur isotopic compositions and characteristic of meteoric water in China[J]. Natural Science Advance, 1994, 4(6): 741 - 745. (in Chinese)

[23] 林耀庭, 高立民, 宋鹤彬. 四川盆地海相三叠系硫同位素组成及其地质意义[J]. 地质地球化学, 1998, 26(4): 43 - 49.
Lin Yaoting, Gao Limin, Song Hebin. Sulfur isotopic composition of the marine Triassic in the SiChuan Basin and its geolocical significance[J]. Geology-Geochemistry, 1998, 26(4): 43 - 49. (in Chinese with English abstract)

[24] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 143 - 192.
Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. Stable isotopic geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2000: 143 - 192. (in Chinese)

[25] Hanor J S. Physical and chemical controls on the composition of waters in sedimentary basins[J]. Marine and Petroleum Geology, 1994, 11(1): 31 - 45.

[26] Fisher J B, Boles J R. Water-rock interaction in Tertiary sandstone, San Jeoquin Basin, Californa, USA: Diagenetic control on water composition[J]. Chemical Geology, 1990, 82: 83 - 101.

[27] 蔡春芳. 流体地球化学:成因、流动与流体-岩石相互作用及塔里木盆地实例分析[D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所,2000: 3 - 50.
Cai Chunfang. Fluid origin and flow, fluid-rock interaction and case-study from the Tarim basin, northwest China[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2000: 3 - 50. (in Chinese with English abstract)

[28] 袁见齐, 杨谦, 孙大鹏, 霍承禹, 蔡克勤, 王文达, 刘训健. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 158 - 166.
Yuan Jianqi, Yang Qian, Sun Dapeng, Huo Chengyu, Cai Keqin, Wang Wenda, Liu Xunjian. The formation conditions of the potash deposits in Charhan Saline Lake, Qaidam Basin, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 158 - 166. (in Chinese with English abstract)