

# 阿尔金山两侧盐湖物质来源、成钾作用及其控制因素研究

李建森<sup>1,2)</sup>, 山发寿<sup>1,2)</sup>, 张西营<sup>1,2)</sup>

1) 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海西宁, 810008;  
2) 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海西宁, 810008

**内容提要:**塔里木盆地东部的罗布泊盐湖和柴达木盆地西部的盐湖分别位于阿尔金山两侧, 均产出有大量富钾卤水, 在油气藏开采中还伴随产出富钾油田水。为探讨阿尔金山两侧盐类资源富集机制及其控制因素, 综合分析了罗布泊盐湖、柴达木盆地西部盐湖以及油田水的水化学和氢氧同位素地球化学特征, 发现: 富钾卤水的形成除依靠地表汇入水体的蒸发浓缩作用外, 罗布泊晶间水、柴达木晶间水和油田水氢氧同位素均可演化至  $\delta D = -30\text{‰}$ ,  $\delta^{18}O = 7.5\text{‰}$  左右, 可能是深部流体上涌补给的结果。同时, 根据  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值并结合  $\delta^{11}B$ 、 $^3He/^4He$  同位素特征确认了盐湖成矿与深部流体有关, 且指示罗布泊盐湖更具深源特征。深部流体对于两侧盆地成盐富钾有关键性作用, 罗布泊盐湖可能接受深部流体补给, 柴达木盆地西部富钾盐湖卤水多数可接受油田水的补给, 而少部分可能接受深部流体补给。

**关键词:** 富钾卤水; H-O-Sr-B-He 同位素; 深部流体; 柴达木盆地西部; 罗布泊

青海柴达木盆地与新疆罗布泊是我国液体钾矿的主产地, 富钾卤水地球化学一直是钾盐矿床地质研究的热点。随着测试分析精度的提高以及遥感等新技术的推广, 众多新成果不断涌现, 对钾盐成矿规律取得了重要认识。对于柴达木盆地, “高山深盆成盐”理论较好地阐述了中国陆相典型钾盐矿床成盐模式和富集规律(Yuan Jianqi et al., 1983), 认为除周围山系水体汇入外, 通过深大断裂上涌的深部水对盐湖钾的补给至关重要, 这在后期研究中也取得了大量的证据(Zhang Pengxi, 1987; Lowenstein et al., 1989), 并先后在马海、大浪滩、昆特依含盐盆地发现油田水补给盐湖成矿的线索(Wang Mili et al., 1992, 1993, 1997)。自1995年发现罗布泊超大型钾盐矿床以来, 基于对罗布泊盐湖第四纪晶间卤水的氢、氧、硫、锶同位素特征研究, 认为钾背景值较高的地表水体汇入后经蒸发成矿, 盐湖中上升卤水流体则指示深部水体对于盐湖成钾有积极意义(Liu Chenglin et al., 1999, 2003)。进而, 通过对罗布泊

地下卤水的稀有气体同位素研究推测幔源物质对成钾的贡献值得关注(Bo Ying et al., 2012)。柴达木盆地西部与罗布泊盐湖由阿尔金山相隔, 研究表明: 断裂带附近可能伴随强烈的流体活动(Hollinsworth et al., 2019), 且具有高盐度特点(Boonchaisuk et al., 2017; Georgia et al., 2019), 盐类物质的聚集可能与深部流体有关联。

近年来, 项目组数次对柴达木盆地西部地区开展野外科考, 获得了大量的富钾卤水地球化学资料, 对柴达木盆地富钾卤水水文地质过程及钾盐成矿规律取得了一定认识, 认为大型断裂带附近的深源流体可能对富钾卤水的形成有十分重要的贡献(Li Jiansen et al., 2014)。阿尔金山主要在第四纪抬升, 柴达木、塔里木两盆地在古生界、中生界和第三系可能有相似的成盐成钾条件(Zhu Yunzhu et al., 1990)。那么柴达木与罗布泊盐湖, 成钾模式及其控制因素是否具有一定相似性? 基于此问题, 本文将柴达木盆地西部与罗布泊盐湖富钾地下卤水地球化

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 41972258、41672087), 青海省自然科学基金青年项目(编号 2021-ZJ-980Q), 中国科学院青年创新促进会人才项目(编号 2020428)联合资助的成果。

收稿日期: 2020-11-08; 改回日期: 2021-03-24; 网络发表日期: 2021-05-27; 责任编辑: 潘静。

作者简介: 李建森, 男, 1987年生。助理研究员, 主要从事水文地质学研究。E-mail: songtaowuya@163.com。

**引用本文:** 李建森, 山发寿, 张西营. 2021. 阿尔金山两侧盐湖物质来源、成钾作用及其控制因素研究. 地质学报, 95(7): 2205~2213, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021188.  
Li Jiansen, Shan Fashou, Zhang Xiyong. 2021. Study on the material source, potassium formation and its controlling factors in salt lakes on both sides of the Altun Mountain. Acta Geologica Sinica, 95(7): 2205~2213.

学特征进行对比分析,以强化对典型陆相盆地成钾规律的认识。

## 1 区域地质概况

阿尔金山作为青藏高原的西北部边界,分隔了塔里木盆地和柴达木盆地,是中亚大陆一条重要的左行走滑断裂带。新生代以来,阿尔金断裂的多次大规模走滑和隆升运动联合控制了两侧盆地的构造和演化(Sun Jimin et al., 2005)。在持续挤压应力作用下,阿尔金造山带被多次激活隆升,并向北在罗布泊凹陷内形成系列挤压冲断(Jolivet et al., 2001),其中以北北东向断裂组最为发育。尤其是罗北凹地和东部台地,发育较多新生张性断裂,控制着罗北凹地的形成和发展。北东向和北西向断裂组成共轭断裂带(Wang Mili et al., 2001),延伸远,规模大,穿过罗布泊干盐湖并控制着其北界(Liu Chenglin et al., 2006; Shi Wei et al., 2009)。上新世至早更新世,随着阿尔金山的急剧走滑隆升,柴达木盆地发育了新生代同沉积的反“S”型构造带及一系列近南北向褶皱构造带,并经受多期次改造和沉积(Li Haibing et al., 2002)。

在柴达木盆地西部的大浪滩、冷湖等地区,以及罗布泊凹陷内,均赋存有第四纪富钾卤水,资源储量巨大。塔里木盆地分布有第三纪以前的油田水,柴达木盆地西部如南翼山、狮子沟、冷湖、大浪滩、大风山等背斜构造带内,也赋存大量的第三系富钾油田水。

## 2 样品采集及测试分析

2016~2017年,采集柴达木盆地西部晶间卤水18件(包括大浪滩和冷湖地区30 m深度地下卤水)、油田水20件(包括南翼山、大浪滩、狮子沟、大风山、冷湖地区,深度800~4000 m,层位覆盖古近系一新近系),区域地质构造及采样点分布见图1。2017年9月,在中国科学院青海盐湖研究所化学分析测试中心进行水体的全化学分析,在中国地质科学院水文地质环境地质研究所地下水科学与工程重点实验室利用 Gasbench-连续流稳定同位素质谱仪(IRMS)在线分析了水样的氢氧同位素,测试精度 $\delta D$ 优于1‰、 $\delta^{18}O$ 优于0.5‰。2017年6月采集罗布泊“大耳朵湖”卤水9件,于2017年9月在中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心利用TIMS固体

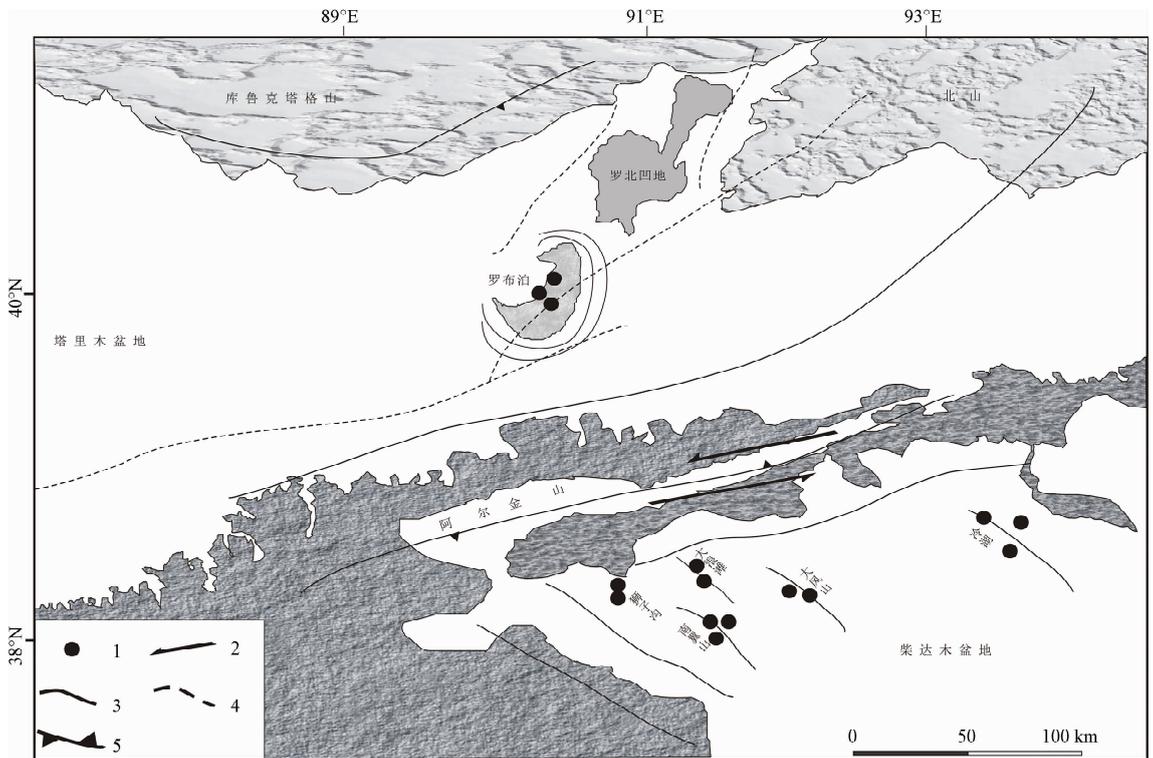


图1 研究区地质构造及采样点分布图

Fig. 1 Distribution diagram of geological structure and sampling points in the study area

1—采样点;2—走滑断层;3—一般断层;4—隐伏断层;5—大型断裂带

1—Sampling point; 2—strike-slip faults; 3—general fault; 4—concealed fault; 5—large fault zone

热电离质谱仪对卤水样品进行硼同位素测试分析, 2018年2月在核工业北京地质研究院利用TIMS固体热电离质谱仪对部分样品进行锶同位素测定。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 水化学特征及其成因

罗布泊盐湖卤水、塔里木盆地油田水、柴达木盆地西部地下卤水与油田水水化学组成见表1。罗布泊盐湖和柴达木盆地西部盐湖晶间卤水水化学类型一致,均属硫酸盐型。具有较高的K含量,超过工业开采品位,皆为富钾卤水。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等常量离子含量分布范围相同,而B、Li、Sr、Br、Rb等微量元素,作为对沉积环境变化和水体演化过程极为敏感的化学指标,含量也在同一分布范围内。钻孔揭露更新世以来罗布泊与柴达木盆地成盐年代及盐类沉积的物质组成较为一致(Lü Fenglin et al., 2015; Fang Xiaomin et al., 2016),第四纪晶间卤水赋存于盐类矿物孔隙中,存在上下对流运动,不仅可以承袭早期沉积的盐类物质,且共同接受区域大气降水和阿尔金山风化成盐元素补给,导致两盆地晶间卤水的物质来源、赋存环境及地球化学演化过程受控于相同的地质环境因素。

塔里木盆地油气藏时代从奥陶纪至三叠纪均有分布,而柴达木油田水几乎全部为第三系产出。由水化学组成特征可看出,塔里木与柴达木油田水均为相对高钙低镁的氯化钙型水体,这与长期封存在

地层中且接受多种来源的补给有关,在水化学组成上与第四纪晶间卤水有较大差别。由于塔里木盆地油田水主要分布在盆地中部及西北地区,同时受天山、西昆仑山断裂带的控制,水体产出时代跨度大,且多次受海侵的影响而接受海水掺入,由此造成与柴达木油田水在元素含量上的差异。油田水与晶间卤水相比较具有低的K浓度和矿化度,说明除物源因素外,晶间卤水经历了强烈的蒸发作用。而油田水相对封闭赋存于泥岩和碳酸盐岩地层中,较少溶蚀NaCl盐层,在地层中不会经受持续的蒸发作用。

#### 3.2 同位素地球化学特征

##### 3.2.1 氢氧同位素地球化学

将罗布泊和柴西地区晶间卤水和油田水的氢氧同位素值投至 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图上(图2),并将水体同位素数据进行拟合,所得拟合线均与全球大气降水线相交,说明水体主要起源于大气降水。但整体上,位于大气降水线右下方,这与水体演化过程中的蒸发作用和水岩反应等因素有关。从图2中可以看出,其演化趋势各不相同,除蒸发作用和水岩反应差异外,应该与补给水体的不同有较大关系。尤其是在水体演化至一定程度时,卤水强烈变质,罗布泊晶间卤水、柴达木晶间卤水和柴达木油田水氢氧同位素演化趋势线交于一点( $\delta\text{D} = -30\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O} = 7.5\text{‰}$ ),呈现了罗布泊晶间卤水高于塔里木油田水、柴达木油田水,略高于柴达木晶间卤水的氢氧同位素分布特征。

表 1 柴达木盆地西部和塔里木盆地东部富钾卤水水化学特征

Table 1 Chemical characteristics of potassium-rich brine in western Qaidam basin and eastern Tarim basin

类别	取样位置	$\text{K}^+$ (g/L)	$\text{Ca}^{2+}$ (g/L)	$\text{Na}^+$ (g/L)	$\text{Mg}^{2+}$ (g/L)	$\text{SO}_4^{2-}$ (g/L)	$\text{Cl}^-$ (g/L)	B (mg/L)	Li (mg/L)	Sr (mg/L)	Br (mg/L)	Rb (mg/L)
晶间卤水	大耳朵湖	13.9	0.5	119.7	18.2	17.6	208.2					
		10.4	0.5	87.3	15.5	32.0	252.8	89.9	19.0	6.0	21.0	0.3
		10.1	9.0	105.0	11.8	16.1	184.7					
	罗北凹地	10.5	0.3	87.7	9.8	59.4	173.4					
		12.4	0.2	76.5	22.8	32.4	195.6	67.2	18.2	0.6	15.3	1.3
		8.1	0.2	89.6	17.4	44.0	180.0					
冷湖 大浪滩	9.9	0.3	104.3	16.2	38.6	176.8	69.2	18.6	6.9	16.4	1.3	
	10.8	0.3	99.6	8.6	26.5	168.3	82.9	10.8	10.6	9.6	0.8	
油田水	塔里木 南翼山	4.9	8.5	35.9	0.8	0.7	79.6	32.6	9.2	386.6	65.4	—
		7.5	14.0	82.9	0.9	0.2	159.8	782.3	215.6	653.2	32.5	25.3
	大浪滩	2.6	1.9	76.5	0.7	3.2	132.5	562.5	28.9	69.3	22.2	8.5
		0.9	0.7	95.9	0.3	6.1	143.1	165.6	23.2	32.2	31.5	10.2
	大风山 冷湖	1.6	4.9	59.9	1.0	0.2	103.6	486.0	48.6	588.2	36.8	5.6
		0.7	3.3	10.7	0.7	0.1	18.1	156.4	25.3	86.2	6.6	3.2

注:以上卤水样品离子含量除大耳朵湖(Ma Lichun et al., 2010)、罗北凹地(Wang Mili et al., 2001)外,其余均为多组样品平均值(晶间卤水中:冷湖  $n=8$ ;大浪滩  $n=10$ 。油田水中:塔里木  $n=32$ ,引自 Cai Chunfang et al., 1996;南翼山  $n=4$ ;大浪滩  $n=5$ ;狮子沟  $n=3$ ;大风山  $n=4$ ;冷湖  $n=4$ ),“—”表示无相关数据报道。

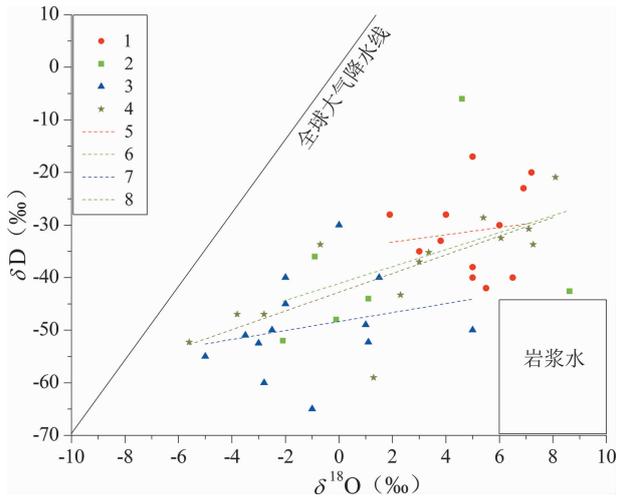


图2 阿尔金山两侧富钾卤水水体的氢氧同位素组成  
Fig. 2 Hydrogen and oxygen isotopic composition of potassium-rich brine on both sides of Altun Mountain

1—罗布泊晶间卤水; 2—柴达木晶间卤水; 3—塔里木油田水; 4—柴达木油田水; 5—罗布泊晶间卤水拟合线; 6—柴达木晶间卤水拟合线; 7—塔里木油田水拟合线; 8—柴达木油田水拟合线  
1—Lop Nur intercrystalline brine; 2—Qaidam intercrystalline brine; 3—Tarim oilfield water; 4—Qaidam oilfield water; 5—Lop Nur intercrystalline brine fitting line; 6—Qaidam intercrystal brine fitting line; 7—Tarim oilfield water fitting line; 8—Qaidam oilfield water fitting line

强烈的蒸发作用往往可以使水体具有高的 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值,但高达 7.5‰ 以上的 δ<sup>18</sup>O 与低至 -30‰ 的 δD 值并不符合水体蒸发过程中的动力分馏。为了更好地理解卤水的氢氧同位素特征,室内条件下将柴达木盆地河水蒸发 500 倍,直至淡水变为卤水且进入析盐阶段,发现水体的氢氧同位素可以从 δD = -69.5‰, δ<sup>18</sup>O = -9.6‰ 升高至 δD = 11.6‰, δ<sup>18</sup>O = 9.2‰,这与柴达木盆地实测的经受强烈蒸发成因湖泊的氢氧同位素组成一致,如作为盐湖的希里沟湖(δD = 21.3‰, δ<sup>18</sup>O = 7.93‰)和茫崖湖(δD = 4‰, δ<sup>18</sup>O = 4.15‰),以及仅为咸水湖的托素湖(δD = 28.2‰, δ<sup>18</sup>O = 7.34‰)和尕斯库勒湖(δD = 4.4‰, δ<sup>18</sup>O = 3.88‰),这充分说明单纯依靠水体的蒸发,难以形成高 δ<sup>18</sup>O、低 δD 值的富钾卤水。

柴达木盆地新生代湖相地层碳酸盐岩具有较高的 δ<sup>18</sup>O 值(Li Linlin et al., 2017),水岩反应可以在一定程度上提高水体的 δ<sup>18</sup>O 值。但是部分晶间卤水 δD 为 -44.5‰、δ<sup>18</sup>O 为 8.6‰,这种异常的同位素组成应该与特殊的物源补给有关。油田水具有相对低的 δD 和相对高的 δ<sup>18</sup>O,研究发现生烃、排烃过程可导致油田水的 δD 值偏负,并促进水岩反应使

得 δ<sup>18</sup>O 正漂移(Cai Chunfang et al., 1997)。塔里木盆地油田水的地质时代要远早于柴达木盆地油田水,在地层埋藏环境下,经历了长期的地下蒸发浓缩和水岩反应,但其 δD 值与柴达木盆地油田水类似,而 δ<sup>18</sup>O 值低于 5‰,而部分柴达木油田水的 δ<sup>18</sup>O 值可接近于岩浆水。世界各地沉积盆地油田水的氢氧同位素特征已有大量报道,如德国北部易北河盆地石炭纪—二叠纪油田水(Lüders et al., 2010)、法国巴黎盆地三叠纪油田水(Millot et al., 2012)、美国密歇根盆地志留纪油田水(Wilson et al., 1993)、美国墨西哥湾北部晚侏罗世油田水(Moldovanyi et al., 1993)等,但是未见有接近岩浆水的氢氧同位素组成,这表明柴达木油田水可能接受了更多的深源岩浆流体补给,那些具有低 δD、高 δ<sup>18</sup>O 的晶间卤水也应该与深源流体或油田水的补给有关。罗布泊盐湖具有“上升卤水流补给成钾”的特征,大气深循环水或地层水等地壳深部流体上涌补给盐湖成钾(Liu Chenglin et al., 2003)。同样,柴达木盆地第三系油田水也可能接受了深部地壳甚至幔源物质的补给。深源流体可以影响卤水水体演化,从而使得罗布泊盐湖晶间水、柴达木盐湖晶间水和柴达木油田水具有相似的氢氧同位素组成。

### 3.2.2 锶、硼、氮同位素地球化学

研究 Sr 的来源对于揭示卤水成因演化具有指示意义,卤水的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 地球化学是最为直接的示踪手段,阿尔金山两侧水体的锶同位素组成见表 2 和图 3。典型幔源 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值为 0.704,典型壳源 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值为 0.720,而古海水 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值分布在 0.707~0.709 之间。柴达木盆地西部和罗布泊盆地的河水、湖水、晶间卤水以及油田水各类水体的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值分布在 0.71026~0.71290 之间,总体上略高于海水而低于地壳值。一方面,差异相对较小

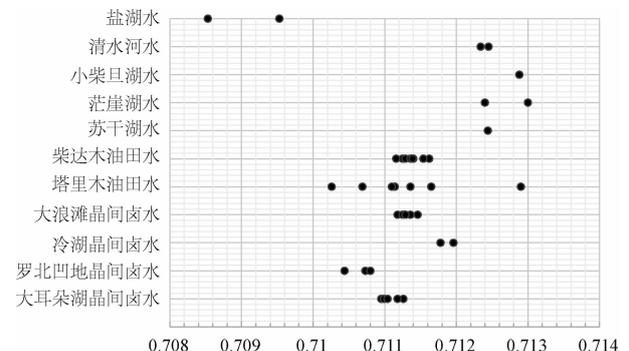


图3 阿尔金山两侧水体的锶同位素地球化学组成  
Fig. 3 Strontium isotope geochemistry composition of water on both sides of Altun Mountain

表 2 阿尔金山两侧水体的锶同位素地球化学组成

Table 2 Strontium isotope geochemistry composition of water on both sides of Altun Mountain

类别	取样位置	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 高值	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 低值	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均值	资料来源
晶间卤水	大耳朵湖	0.71126	0.71095	0.71118	本文
	罗北凹地	0.71080	0.71044	0.71066	Liu Chenglin et al., 1999
	冷湖	0.71196	0.71178	0.71187	Wang Mili et al., 1997
	大浪滩	0.71146	0.71118	0.71127	本文
油田水	塔里木	0.71290	0.71026	0.71114	Cai Chungfang et al., 1997
	柴达木	0.71165	0.71120	0.71140	本文
湖表水	苏干湖	0.71244	0.71244	0.71244	Tan Hongbing et al., 2011
	茫崖湖	0.71240	0.71300	0.71270	
	小柴旦	0.71288	0.71288	0.71288	
河水	清水河	0.71245	0.71234	0.71240	Wang Mili et al., 1997

的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值反映了两盆地水体来源具有一致性,体现了两盆地晶间卤水和油田水都与周边岩石风化淋滤水体的补给有关;另一方面,晶间卤水和油田水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较之于冰雪融水补给形成的地表河流、湖泊水体要低,这体现了水体来源的差异性。

长期接受昆仑山冰雪融水补给的茫崖湖、接受祁连山冰雪融水补给的小柴旦湖、接受阿尔金山冰雪融水补给的清水河和苏干湖,三者的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值十分接近,这类水体物质来源单一,且不具有富钾特征,更贫乏 B、Li、Rb 等元素,为大陆地壳物质风化淋滤的结果。其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 0.71261,高于全球河流水平均值 0.7116 (Davis et al., 2003),这与青藏高原山体花岗岩以及变质岩等基岩具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(平均 0.71358)有关(Wu Cailai et al., 2009; Li Yunshuai et al., 2015)。柴达木盆地西部的冷湖晶间卤水受清水河和苏干湖水补给,然而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值却远低于补给水体。对于咸水或卤水蒸发过程中的锶同位素分馏,目前未见报道,针对此,我们对柴达木盆地马海干盐湖 1.6 m 剖面石盐和石膏样品共计 8 件进行了锶同位素测试,发现其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布在 0.71126~0.71153 之间,并未出现较大波动,与 5 m 深度晶间卤水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(0.71148)一致,这在很大程度上说明随着水体的蒸发,液相组分和析出物之间发生的锶同位素分馏不明显,锶同位素不会随着水体的蒸发浓缩而出现较大的分馏。假设冷湖晶间卤水全部来源于清水河和苏干湖水体的补给,那么可以推测,经过蒸发浓缩形成的卤水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值应该大于 0.712 而接近 0.713。因此,晶间卤水接受了低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值端元水体的补给。同样,基本无地表水体补给的大浪滩晶间卤水却具有更低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,甚至低于盆地油田水,可能是直接接受具有低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的深部流体补给导致,如位于冷湖的“盐湖”断裂带出露水

体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.70853,被认为是地壳深部流体(Wang Mili et al., 1997),并补给到地表。柴达木盆地油田水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值低于地表水体,也是由于深部流体补给导致。

罗布泊盆地大耳朵湖和罗北凹地卤水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值分别为 0.71118 和 0.71066,低于柴达木盆地西部油田水和晶间卤水,也低于塔里木盆地油田水。因此,完全由相对高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的河水补给难以形成罗布泊盐湖卤水,而可能与柴达木盆地西部卤水类似,由低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的深源流体补给。为了验证这一假设,结合 $\delta^{11}\text{B}$ 进行探讨。

据本研究实测,塔里木油田水的 $\delta^{11}\text{B}$ 值平均为 28.6‰,可能与古海水( $\delta^{11}\text{B}$ 值为 39.5‰)掺入有关,而古海水具有较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,因此,塔里木油田水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低。而大耳朵湖的 $\delta^{11}\text{B}$ 值平均为 12.2‰,罗北凹地 LDK01 钻孔 9 件晶间卤水 $\delta^{11}\text{B}$ 组成为 12.2‰~16.5‰(Liu Chenglin et al., 2020),显示与海水无关,也就说明罗布泊盐湖受到塔里木盆地油田水的影响较小。大耳朵湖与罗北凹地卤水的 $\delta^{11}\text{B}$ 值还低于柴达木盆地西部部分油田水(19.6‰)和河水(17.1‰),而与可可西里地区唯一 $\text{CaCl}_2$ 型的勒斜武旦富硼锂盐湖的 $\delta^{11}\text{B}$ (平均 10.9‰)类似(Ma Ruying et al., 2015),作为富含矿种元素的盐湖卤水,相对低的 $\delta^{11}\text{B}$ 值极有可能与深部流体补给有关,比如大柴旦热泉水(-2.2‰~1.5‰)和昆仑山热泉水(-3.2‰)均具有极低的 $\delta^{11}\text{B}$ 组成,这进一步说明低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 值的罗布泊盐湖极有可能直接接受深部流体的补给。而罗布泊 LDK02 井钻探获取了深部 $\text{CaCl}_2$ 型水(Zhang Hua et al., 2021),证实了这个推测。

这一推断也得到了 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 同位素的支持。罗布泊盐湖的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.1~2.4 倍于大气(Bo Ying et al., 2012),而柴达木盆地油田水的

$^3\text{He}/^4\text{He}$  值为大气值的 0.75 倍(Tan Hongbing et al., 2011),塔里木盆地油田水的 $^3\text{He}/^4\text{He}$  值则仅为大气值的 0~0.4 倍(Xu Sheng et al., 2017)。这充分表征了罗布泊盐湖及柴达木盆地油田水具有幔源物质混入的特征,且罗布泊盐湖可能接受更多的深源流体补给。

### 3.3 深部流体对盐湖的补给

新生代以前,柴达木盆地曾是塔里木盆地的东延部分,两盆地直接相连,阿尔金断裂多次隆升,直至更新世晚期,才将两盆地彻底分隔开来,使其具备相似的成盐成钾条件(Zhu Yunzhu et al., 1990; Yang Fan et al., 1994)。阿尔金断裂带中段发育的系列走滑断陷盆地在上新世至晚更新世时期基本形成,指示了阿尔金大规模走滑变形挤压和隆升的时间(Li Haibing et al., 2002);磷灰石裂变径迹测年结果表明阿尔金山于渐新世和晚上新世分别发生了多次强烈隆升(Chen Zhengle et al., 2006; Jian Xing et al., 2018),这也获得了柴达木、塔里木两盆地的新生代沉积记录支持(Sun Jimin et al., 2005; Li Linlin et al., 2015)。因此,阿尔金断裂带新生代以来的多次快速造山抬升就会在很大程度上影响两侧盆地的发育演化,尤其会在构造—气候—物源上制约罗布泊和柴达木西部的成盐作用(Liu Chenglin et al., 2018)。

对两盆地现今大地热流值的测量研究发现:塔里木盆地大地热流平均  $45.0 \text{ mW/m}^2$ ,整体上属于低温冷盆(Liu Shaowen et al., 2006),低于我国多数大中型沉积盆地,这与盆地自晚古生代以来即为稳定地块有关。柴达木盆地的大地热流平均  $55.1 \text{ mW/m}^2$ ,地温梯度平均  $28.6 \text{ }^\circ\text{C/km}$ ,而盆地西部大地热流可达  $70.4 \text{ mW/m}^2$ ,地温梯度可达  $38.6 \text{ }^\circ\text{C/km}$ ,属于高温区(Li Zongxing et al., 2015),反映了柴达木盆地尤其是柴西地区深部构造-热活动强烈的特点,柴达木盆地雏形形成后经历了中—新生代多期构造运动,直至更新世还经历强烈改造,促进了深部断裂的发育。阿尔金造山带从挤压逆冲到左旋走滑的构造转换过程中,会导致岩浆热液流体的强烈活动及上涌。通过阿尔金山 13 Ma 新生代火山熔岩的化学成分研究,认为该熔岩起源于上地幔,是岩石圈底部减薄,岩浆沿拉伸裂隙喷出的结果(Turner et al., 1993)。Molnar et al. (1993) 研究指出青藏高原在 8 Ma 前后曾一度达到海拔 6000 m 的高度,伴随轻而高温的软流圈物质上涌而造成地壳物质的熔化和熔岩溢出。地震层析和大地构造研究表明,

塔里木地块向南俯冲于阿尔金山下(Wittlinger et al., 1998),并伴随有阿尔金主干断层系的大型走滑,促使阿尔金东段正断层活动,不仅切割了盆地第三纪地层,还切割了全新统(Xu Zhiqin et al., 1999)。受阿尔金造山带走滑隆升控制,促进了深部流体系统的发育。柴达木盆地和塔里木盆地深部地层中碳酸盐岩热液蚀变就是深部流体活动的证据,铁白云石和方解石的致密储层中可见黄铁矿、重晶石、天青石等热液矿物充填裂缝,具有高 Fe、Mn 的特点(Zhang Hao et al., 2018; Su Jin et al., 2021)。同时,在罗布泊钾盐科学钻探工程中发现深部  $\text{CaCl}_2$  水体(Bo Ying et al., 2012; Jiao Pengcheng et al., 2019; Zhang Hua et al., 2021),也是深部流体补给的结果。

## 4 结论

(1)罗布泊与柴达木盆地西部富钾卤水水化学组成的相似性,体现了阿尔金断裂带形成演化对两侧盆地成盐的深刻影响及其钾盐成矿过程的相似性。

(2)对比罗布泊与柴达木盆地西部晶间卤水以及油田水的氢氧同位素组成发现:卤水中矿种元素的巨量富集,仅依靠地表汇入水体的蒸发作用是难以形成的。部分罗布泊晶间水、柴达木晶间水和柴达木油田水氢氧同位素呈现低  $\delta\text{D}$ 、高  $\delta^{18}\text{O}$  特征,可能与深源流体补给有关。

(3)罗布泊与柴达木盆地西部富钾水体的锶、硼和氩同位素组成揭示:除地表水体携大量成盐物质汇入及蒸发浓缩外,罗布泊盐湖卤水可能存在深部流体的补给;柴达木盆地卤水接受油田水的补给,少部分卤水则可能受深源流体补给;柴达木盆地西部油田水也与深源流体的补给有关。

**致谢:**感谢中国地质科学院矿产资源研究所刘成林研究员的宝贵建议和耐心指导,感谢匿名评审专家提出的建设性意见,提高了本文质量,谨致谢忱!

## References

- Bo Ying, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Ye Xianren. 2012. The mantle source noble gas from underground brine of the Lop Nur in Xinjiang and its scientific significance. *Geology in China*, 39 (4): 978~984 (in Chinese with English abstract).
- Boonchaisuk S, Noisagool S, Amatyakul P, Arunwan T R, Vachiriatienchai C, Siripunvaraporn W. 2017. 3-D magnetotelluric imaging of the Phayao Fault Zone, Northern Thailand: evidence for saline fluid in the source region of the 2014 Chiang Rai earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*,

- 147; 210~221.
- Cai Chunfang, Mei Bowen, Li Wei. 1996. Hydrogeochemical behaviors of oilfield water in Tarim Basin. *Geochimica*, 25(6): 614~623(in Chinese with English abstract).
- Cai Chunfang, Mei Bowen, Ma Ting, Zeng Fangang. 1997. Origin and evolution of oilfield water in Tarim Basin. *Geological Reviews*, 43(6): 650~657(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengle, Gong Hongliang, Li Li, Wang Xiaofeng, Chen Bolin, Chen Xuanhua. 2006. Cenozoic uplift and exhumation process of Altyn Tagh. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 91~102 (in Chinese with English abstract).
- Davis A C, Bickle M J, Teagle D A H. 2003. Imbalance in the oceanic strontium budget. *Earth and Planetary Science Letters*, 211(1-2): 173~187.
- Fang Xiaomin, Li Minghui, Wang Zhengrong, Wang Jiuyi, Li Jiao, Liu Xiaoming, Zan Jinbo. 2016. Oscillation of mineral compositions in core SG-1b, Western Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 6: 1~7.
- Georgia P P, David J W, Justin N. 2019. Scapolite and analcime: Monitors of magmatic fluid metasomatism in a major shear zone. *Chemical Geology*, 522: 208~222.
- Hollingsworth A D, Koehn D, Dempster T J, Aanyu K. 2019. Structural controls on the interaction between basin fluids and rift flank fault: constraints from the Bwamba fault, East African rift. *Journal of Structural Geology*, 118: 236~249.
- Jian Xiang, Guan Ping, Zhang Wei, Liang Hanghai, Feng Fan, Fu Ling. 2018. Late Cretaceous to early Eocene deformation in the Northern Tibetan Plateau: Detrital apatite fission track evidence from Northern Qaidam Basin. *Gondwana Research*, 60: 94~104.
- Jiao Pengcheng, Liu Chenglin, Zhang Hua, Yan Hui, Zhang Fankai, Li Wenxue. 2019. Progress in exploration of deep potassium-rich brine in Lop Nur. *Proceedings of the 9th national symposium on metallogenic theory and prospecting methods*, Nanjing, 454 (in Chinese).
- Jolivet M, Brunel M, Seward D, Xu Z, Yang J, Roger F, Tapponnier P, Malavielle J, Arnaud N, Wu C. 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan plateau: fission-track constraints. *Tectonophysics*, 343: 111~134.
- Li Haibing, Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, Tapponnier P, Wan Yusheng, Zhang Jianxin, Meng Fancong. 2002. Determination of Altun strike-slip fault basin and its relationship with mountain range. *Chinese Science Bulletin*, 47(1): 63~67(in Chinese with English abstract).
- Li Jiansen, Li Tingwei, Li Zhongping, Ma Haizhou. 2014. Hydrogeochemical behaviors of oilfield water in the Tertiary from western Qaidam Basin. *Oil and Gas Geology*, 31(1): 50~55(in Chinese with English abstract).
- Li Linlin, Guo Zhaojie, Guan Shuwei, Zhou Suping, Wang Mingzhen, Fang Yanan, Zhang Chenchen. 2015. Heavy mineral assemblage characteristics and the Cenozoic late Paleozoic time of the Qaidam Basin. *Science China; Earth Science*, 45(6): 780~789(in Chinese with English abstract).
- Li Linlin, Wu Chaodong, Fan Changfu, Li Jijun, Zhang Changhao. 2017. Carbon and oxygen isotopic constraints on paleoclimate and paleoelevation of the Southwestern Qaidam Basin, Northern Tibetan plateau. *Geoscience Frontiers*, 8: 1175~1186.
- Li Yunshuai, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Li Shengrong, Gong Jianghua. 2015. Origin of early Paleozoic garnet peridotite and associated garnet pyroxenite in the South Altyn Tagh, NW China; constraints from geochemistry, SHRIMP U-Pb zircon dating and Hf isotopes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 100: 60~77.
- Li Zongxing, Gao Jun, Zheng Ce, Liu Chenglin, Ma Yinsheng, Zhao Weiyong. 2015. Present heat flow and tectonic-thermal evolution since the late Paleozoic time of the Qaidam Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(10): 3687~3705(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng. 1999. Hydrogen, oxygen, strontium and sulfur isotopic geochemistry and potash forming material sources of Lop Salt Lake, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 18(3): 268~275 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili, Li Shude, Chen Yongzhi. 2003. Ascending brine fluids in Quaternary salty lake of Lop Nur in Xinjiang and their significance in potash formation. *Mineral Deposits*, 22(4): 386~392 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, Li Shude, Chen Yongzhi. 2006. Features and Formation Mechanism of Faults and Potash-forming Effect in the Lop Nur Salt Lake, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 936~943.
- Liu Chenglin, Wang Licheng, Yan Maodu, Zhao Yanjun, Cao Yangtong, Fang Xiaomin, Shen Lijian, Wu Chihua, Lv Fenglin, Ding Ting. 2018. The Mesozoic-Cenozoic tectonic settings, paleogeography and evaporitic sedimentation of Tethyan blocks within China; implications for potash formation. *Ore Geology Reviews*, 102: 406~425.
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili. 2020. Formation conditions and laws of potash deposit in Lop Nur salt lake. Beijing: Science Publishing House, 1~219(in Chinese).
- Liu Shaowen, Wang Liangshu, Li Cheng, Zhang Peng, Li Hua. 2006. Lithospheric thermovrheological structure and Cenozoic thermal regime in the Tarim Basin, Northwest China. *Acta Geologica Sinica*, 80(3): 344~350 (in Chinese with English abstract).
- Lowenstein T K, Spencer R J, Zhang P X. 1989. Origin of ancient potash evaporites: Clues from the modern nonmarine Qaidam Basin of Western China. *Science*, 245: 1090~1092.
- Lüders V, Plessen B, Romer R L, Weise S M, Banks D A, Hoth P, Dulski P, Schettler G. 2010. Chemistry and isotopic composition of Rotliegend and Upper Carboniferous formation waters from the North German Basin. *Chemical Geology*, 276: 198~208.
- Lü Fenglin, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Yan Hui, Zhang Hua, Zhao Yanjun, Wang Licheng. 2015. The discussion on sedimentary characteristics, phased evolution and controlling factors of saline lake in Asia interior: records from deep drill cores of LDK01 in Lop Nur, Xinjiang, northwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2770~2782 (in Chinese with English abstract).
- Ma Lichun, Li Baoguo, Jiang Pingan, Zhong Junping, Sheng Jiandong, Qiu Honglie, Wu Hongqi. 2010. Geochemical characteristics and enrichment mechanism of potassium in Lop Nur great ear playa. *Mineral Deposits*, 29(4): 616~624 (in Chinese with English abstract).
- Ma Ruying, Han Fengqing, Ma Haizhou, Ma Yunqi. 2015. Hydrochemical characteristics and boron isotope geochemistry of brine in Hoh Xil, Qinghai Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(1): 60~66 (in Chinese with English abstract).
- Millot R, Guerrot C, Innocent C, Sanjuan B. 2011. Chemical, multi-isotopic and thermal characterization of Triassic formation waters from the Paris Basin. *Chemical Geology*, 283: 226~241.
- Millot R, Hegan A, Philippe N. 2012. Geothermal waters from the Taupo volcanic zone, New Zealand; Li, B and Sr isotopes characterization. *Applied Geochemistry*, 27: 677~688.
- Moldovanyi E P, Walter L M, Land L S. 1993. Strontium, boron, oxygen, and hydrogen isotope geochemistry of brines from basal strata of the Gulf Coast sedimentary basin, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 2083~2099.
- Molnar P, England P, Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan plateau, and the India Monsoon. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357~396.
- Shi Wei, Liu Chenglin, Yang Haijun, Ma Yinsheng, Jie Aiguo. 2009. Research on neotectonic of the Lop Nur Basin based on sand box experiments. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(4): 529~534.

- Su Jin, Wang Xiaomei, Yang Haijun, Yu Fang, Li Yong, Ma Shihong. 2021. Hydrothermal alteration and hydrocarbon accumulations in ultra-deep carbonate reservoirs along a strike-slip fault system, Tarim Basin, NW China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 203: 1~18.
- Sun Jimin, Zhu Rixiang, An Zisheng. 2005. Tectonic uplift in the northern Tibetan plateau since 13. 7 Ma ago inferred from molasse deposits along the Altyn Tagh fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(3-4): 641~653.
- Tan Hongbing, Rao Wenbo, Ma Haizhou, Chen Jun, Li Tingwei. 2011. Hydrogen, oxygen, helium and strontium isotopic constraints on the formation of oilfield waters in the western Qaidam basin, China. *Journal of Asian Earth sciences*, 40(2): 651~660.
- Turner S, Hawkesworth C, Liu J, Rogers N, Kelley S, Calsteren P. 1993. Timing of Tibetan uplift constrained by analysis of volcanic rocks. *Nature*, 364: 50~53.
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng. 2001. Potash Resources of Lop Nur Salt Lake. Beijing: Geological Publishing House, 130~132(in Chinese).
- Wang Mili, Wang Yijie, Liu Chenglin, Chen Yongzhi. 1993. The features and genesis of the Dalangtan salt deposit in Qaidam basin. *Bulletin of Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences*, 26: 97~114 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mili, Wu Bihao, Tian Bai, Li Xing. 1992. Main features and formation conditions of salt deposits in Mahai subbasin, Qaidam Basin. *Bulletin of Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences*, 1: 81~93 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mili, Yang Zhichen, Liu Chenglin. 1997. Potash Deposits and Their Exploitation Prospects of Saline Lakes of the Northern Qaidam Basin. Beijing: Geological Publishing House, 63~67(in Chinese).
- Wilson T P, Long D T. 1993. Geochemistry and isotope chemistry of Ca-Na-Cl brines in Silurian strata, Michigan basin. *Applied Geochemistry*, 8: 507~524.
- Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, Mei J, Shi D N, Herquel G, Masson F. 1998. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn tagh fault. *Science*, 282: 74~76.
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Robinson P T, Wooden J L, Mazdab F K, Gao Yunhong, Wu Suoping, Chen Qilong. 2009. Geochemistry, age and tectonic significance of granitic rocks in North Altun, Northwest China. *Lithos*, 113(3-4): 423~436.
- Xu Sheng, Zheng Guodong, Zheng Jianjing, Zhou Shixin, Shi Pilong. 2017. Mantle-derived helium in foreland basins in Xinjiang, Northwest China. *Tectonophysics*, 694: 319~331.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Jiang Mei, Li Haibing. 1999. Continental subduction and uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 139~151 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fan, Ye Sujuan, Cao Chunchao, Qiao Qinzheng, Xu Tongchun. 1994. Right lateral characteristics of the middle Eastern segment of Altun fault in Cenozoic era. *Scientia Geologica Sinica*, 29(4): 346~355 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianqi, Huo Chengyu, Cai Keqin. 1983. The high mountain—deep basin saline environment—a new genetic model of salt deposits. *Geological Review*, 29(2): 159~164 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hao, Chen Gang, Zhu Yushuang, Huang Chenggang, Ni Xianglong. 2018. Discovery of rare hydrothermal alterations of oligocene Dolomite reservoirs in the Yingxi area, Qaidam, West China. *Carbonates Evaporites*, 33: 447~463.
- Zhang Pengxi. 1987. Salt Lakes in Qaidam Basin. Beijing: Science Publishing House, 143 (in Chinese).
- Zhu Yunzhu, Zhong Jianhua, Wu Bihao, Liu Chenglin. 1990. Preliminary approach to relationship between uplifting history of Altun mountains and salt forming condition in Tarim and Qaidam basins. *Oil and Gas geology*, 11(2): 136~143 (in Chinese with English abstract).

## 参 考 文 献

- 伯英, 刘成林, 焦鹏程, 叶先仁. 2012. 罗布泊地下水水中幔源稀有气体及其意义. *中国地质*, 39(4): 978~984.
- 蔡春芳, 梅博文, 李伟. 1996. 塔里木盆地油田水文地球化学. *地球化学*, 25(6): 614~623.
- 蔡春芳, 梅博文, 马亭, 曾凡刚. 1997. 塔里木盆地油田水的成因与演化. *地质论评*, 43(6): 650~657.
- 陈正乐, 宫红良, 李丽, 王小凤, 陈柏林, 陈宣华. 2006. 阿尔金山脉新生代隆升-剥露过程. *地质前缘*, 13(4): 91~102.
- 焦鹏程, 刘成林, 张华, 颜辉, 张凡凯, 李文学. 2019. 罗布泊盐湖深部富钾卤水勘查进展. 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集, 454.
- 李海兵, 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, Tapponnier P, 万渝生, 张建新, 孟繁聪. 2002. 阿尔金山走滑断陷盆地的确定及其与山脉的关系. *科学通报*, 47(1): 63~67.
- 李建森, 李廷伟, 李中平, 马海州. 2014. 柴达木盆地第三系油田水文地球化学特征. *石油与天然气地质*, 31(1): 50~55.
- 李林林, 郭召杰, 管树巍, 周苏平, 王明振, 房亚男, 张晨晨. 2015. 柴达木盆地西南缘新生代碎屑重矿物组合特征及其古地理演化. *中国科学: 地球科学*, 45(6): 780~789.
- 李宗星, 高俊, 郑策, 刘成林, 马寅生, 赵为永. 2015. 柴达木盆地现今大地热流与晚古生代以来构造-热演化. *地球物理学报*, 58(10): 3687~3705.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程. 1999. 新疆罗布泊盐湖氢氧硫锶同位素地球化学及钾矿成矿物质来源. *矿床地质*, 18(3): 268~275.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 李树德, 陈永志. 2003. 新疆罗布泊第四纪盐湖上升卤水流体及其成钾意义. *矿床地质*, 22(4): 386~392.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力. 2020. 罗布泊盐湖钾盐矿床形成条件与规律. 北京: 科学出版社, 1~219.
- 刘绍文, 王良书, 李成, 张鹏, 李华. 2006. 塔里木盆地岩石圈热-流变学结构和新生代热体制. *地质学报*, 80(3): 344~350.
- 吕凤琳, 刘成林, 焦鹏程, 颜辉, 张华, 赵艳军, 王立成. 2015. 亚洲大陆内部盐湖沉积特征、阶段性演化及其控制因素探讨——基于罗布泊 LDK01 深孔岩心记录. *岩石学报*, 31(9): 2770~2782.
- 马黎春, 李保国, 蒋平安, 钟俊平, 盛建东, 邱宏烈, 武红旗. 2010. 罗布泊“大耳朵”湖区钾元素地球化学与富集机理. *矿床地质*, 29(4): 616~624.
- 马茹莹, 韩风清, 马海州, 马云麒. 2015. 青海可可西里盐湖湖水化学及硼同位素地球化学特征. *地球学报*, 36(1): 60~66.
- 王弼力, 吴必豪, 田白, 李兴. 1992. 柴达木盆地马海盐矿床基本地质特征及形成条件浅析. *中国地质科学院矿床地质研究所所刊*, 1: 81~93.
- 王弼力, 王仪杰, 刘成林, 陈永志. 1993. 柴达木盆地大浪滩盐矿床基本特征及形成机理. *中国地质科学院院报*, 26: 97~114.
- 王弼力, 杨智琛, 刘成林. 1997. 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, 63~67.
- 王弼力, 刘成林, 焦鹏程. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源. 北京: 地质出版社, 130~132.
- 许志琴, 杨经绥, 姜枚, 李海兵. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原南缘造山带的崛起. *地质前缘*, 6(3): 139~151.
- 杨藩, 叶素娟, 曹春潮, 乔秦征, 许同春. 1994. 新生代阿尔金山断层中东段右行走滑特征. *地质科学*, 29(4): 346~355.
- 袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 1983. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式剖析. *地质论评*, 29(2): 159~164.
- 张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社, 143.
- 朱允铸, 钟坚华, 吴必豪, 刘成林. 1990. 阿尔金山上升史与塔里木-柴达木成盐关系初探. *石油与天然气地质*, 11(2): 136~143.

## Study on the material source, potassium formation and its controlling factors in salt lakes on both sides of the Altun Mountain

LI Jiansen<sup>\*1,2)</sup>, SHAN Fashou<sup>1,2)</sup>, ZHANG Xiyong<sup>1,2)</sup>

1) *Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China;*

2) *Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China*

*\* Corresponding author; songtaowuya@163.com*

### Abstract

Both the Lop Nursalt lake and the western salt lake of the Qaidam basin, which are distributed on both sides of the Altun fault belt, produce a lot of potassium-rich brine, and also produce oilfield water in the Tarim basin and the Qaidam basin. To explore the influence of Altun fault zone on salifying of salt lake, the western Qaidam basin and Lop Nur were systematically studied based on hydrochemical and isotopic characteristics of the water in oilfield and salt lake. It is found that the formation of rich brine potassium is not simply dependent on water evaporation and concentration. The hydrogen and oxygen isotopes of intercrystalline water in the Lop Nur and the Qaidam basin water and oil field can separately reach  $-30\text{‰}$  and  $7.5\text{‰}$ , which is caused by similar geochemical factors, and may be the result of upwelling of the deep source flow along the deep and large faults in the Altun fault belt. Furthermore, strontium, boron and helium isotopic values confirmed that the Lop Nur, the Qaidam brine and the oilfield water are related to deep source flow, and also indicated that Lop Nur has many more deep source characteristics. The Altun fault plays a key role in the formation of salt on both sides. In addition to the massive inflow of surface water and then evaporation, Lop Nur may directly access deep origin supply. Oilfield water in Qaidam basin is also related to the recharge of deep source flow. Most intercrystalline brine in the western of Qaidam basin can accept the recharge of oilfield water, while a few may directly accept the recharge of deep source flow.

**Key words:** potassium-rich brines; elemental and isotopic geochemistry; deep fluids; Qaidam basin; Lop Nur