

柴北缘马海地区更新统砂砾型深层 孔隙卤水成因探讨



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

陈晶源^{1,2)}, 汪青川^{1,2)}, 陈金牛^{1,2)}, 宋桂春^{1,2)}, 张明珠^{1,2)}, 路亮^{1,2)}

1) 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海格尔木, 816099;

2) 青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室, 青海格尔木, 816099

内容提要:近年来在新一轮钾盐资源的地质勘查过程中,在柴达木盆地西部和北部的山前冲洪积扇群的深部,发现了一种以粗砂至砾石孔隙为储层的,富含钾资源的大型陆相卤水矿床。目前该类型卤水矿床的成因尚存在较大的争议,为了探讨柴北缘马海地区砂砾型深层孔隙卤水的水化学特征及其成因,对该地区更新统地层中的深层卤水进行了水化学及 H、O、S、Li 同位素特征分析,结果表明:① 卤水水化学类型为氯化物型,其中, K⁺、Na⁺ 含量较高,整体达到了综合评价指标,具有良好的资源前景;② 卤水的离子特征系数及同位素组成表明卤水具有盐岩溶滤、黏土矿物吸附、强蒸发浓缩、储存环境相对封闭等特征;③ 该卤水是大气降水通过水—岩反应、溶滤作用、吸附作用、蒸发浓缩等一些列地质作用的产物。在终间盐湖与山前冲洪积扇过渡区,随着上覆地层压力的不断增大,残余的古湖水向山前压力小的砂砾石层运移,最终渗流至深部砂砾层,在相对封闭的条件下形成了砂砾型深层孔隙卤水矿床。

关键词:柴达木盆地;柴北缘;砂砾型深层卤水;水化学特征;稳定同位素;成因

马海盐湖位于柴达木盆地北部,是我国重要的盐矿基地,在地表—浅地表位置发育固—液相钾盐矿床(刘卫国等, 1995; 宣之强等, 1997; 马金元等, 2005, 2010; 潘晓晨等, 2013),自 2008 年深层卤水勘查项目实施以来,在马海盐湖北部赛什腾山山前冲洪积扇更新统砂砾石层中发现了巨厚的深层孔隙卤水(焦鹏程等, 2016; 崔庆岗等, 2018),与盆地西部大浪滩、黑北凹地、察汗斯拉图凹地、昆特依凹地的砂砾型深层孔隙卤水(李洪普等, 2022)类似,具有分布广、规模大、富水性较强和易开采等特征(李洪普等, 2014),备受学者关注。盆地西部砂砾型深层孔隙卤水的研究程度较高,前人在对其地球化学特征、成因及成矿模式等方面的研究中取得了重要成果(郑绵平等, 2015, 2016; 韩校立, 2018; 任倩慧等, 2018; 刘颖, 2018; 刘溪溪等, 2020)。马海地区砂砾型深部孔隙卤水的研究甚少,前人通过卤水的水化学特征开展过相关研究(岳鑫等, 2019; 崔庆岗等, 2019; 李洪普等, 2022; Fan Qishun et al., 2024),并提出了不同的卤水成

因,主要观点包括:① 大气降水淋滤古近系—新近系古岩盐成因;② 残余古湖水成因;③ 深部卤水成因。无论持上述何种观点,前人研究均认同大气降水淋滤古岩盐的事实,而对残余古湖水和深部来源存在较大的争议。

为解决砂砾型深层孔隙卤水成因这一关键科学问题,笔者等以柴北缘马海地区砂砾型深层孔隙卤水为研究对象,在野外勘查基础上,对其地球化学特征、H、O、S、Li 同位素特征进行了研究,并探讨了物质来源和卤水成因,为马海地区砂砾型深层孔隙卤水的后续开发、利用提供了科学依据。

1 区域地质背景

柴北缘位于青藏高原北部祁连地块与柴达木地块拼合部位(岳悦等, 2021; 王进寿等, 2022),呈北西向约 800 km 的窄长带状分布,面积约为 3.34 × 10⁴ km²(曾文人等, 2019),从阿尔金山向东延伸到鄂拉山,南北分别被柴达木盆地北缘断裂和祁连南缘宗务隆山南缘断裂所切,东西分别被哇洪山断裂

注:本文为青海省省级地质勘查专项资金科研项目(编号:2023085027ky002)和国家重点研发计划项目(编号:2022YFC2904301)的成果。

收稿时间:2024-05-29;改回时间:2024-12-12;网络首发:2025-01-20;责任编辑:李明、章雨旭。Doi:10.16509/j.georeview.2025.01.022

作者简介:陈晶源,男,1992年生,硕士研究生,工程师,主要从事盐类矿产资源勘查与研究;Email:18810550379@163.com。通讯作者:汪青川,男,1982年生,本科,高级工程师,主要从事盐类矿产资源勘查与研究;Email:41783707@qq.com。

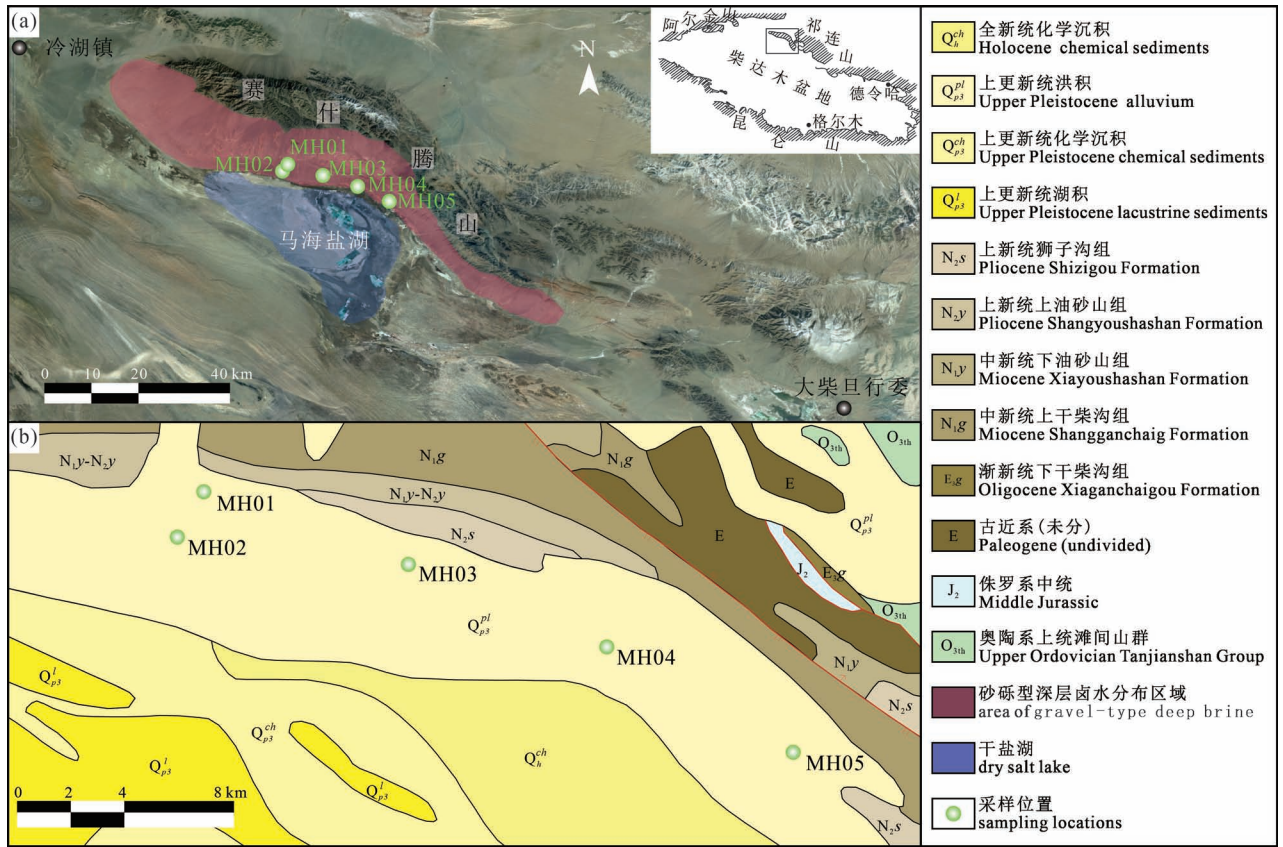


图1 柴北缘马海地区位置图(a)和地质简图(b)(底图据张晓冬等,2021^①)

Fig. 1 The locations and simplified geological map of Mahai area, northern margin of Qaidam Basin (base map from Zhang Xiaodong et al., 2021^①)

和阿尔金左行走滑断裂所切(陆松年等, 2002, 2004; 王惠初等, 2005)。

研究区位于柴北缘马海盆地内,赛什腾山山前、马海盐湖北侧(图 1a)。马海盆地湖盆演化与柴达木盆地其他次级盆地一样,受上新世末以来发生的五次新构造运动控制,经历了四次演化时期(魏新俊等, 1992)。上新世末以前,马海盆地为柴达木古湖的一部分,接受了滨浅湖—三角洲相沉积,上新世末的新构造运动使柴中断裂以北褶皱隆起,形成一系列北西向背斜构造,结束了湖盆的沉积历史(沈振区等, 1990; 李洪普等, 2022),使马海地区由冲洪积扇环境转变为湖泊环境,形成马海凹地,古气候一直向干旱发展(孙非非等, 2010)。早更新世中、晚期两次新构造运动使赛什腾山前断裂再度活动,气候不断向干冷发展,湖水浓缩成为盐湖(崔庆岗等, 2018),马海地区在山前为冲洪积环境,向湖中心普遍出现石盐沉积(李洪普, 2021)。中更新世晚期的第四次新构造运动使马海盆地完全脱离于柴达

木古湖,成为独立的成盐盆地,由于古气候的极端干旱,被解体的古湖大都进入干盐湖阶段(何照等, 2016; 龙鹏宇等, 2022)。直至晚更新世晚期气候极度干旱,补给水量少,全新世最终干涸(魏新俊等, 1992; 袁冶, 2015),形成了现在的盐湖分布格局。

研究区出露的地层主要为古近系、新近系和第四系(图 1b),古近系—新近系主要出露在研究区北部和东北部,岩性组合以泥岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、各类砂岩夹砾岩、含砂砾岩等多次韵律沉积为特征,沉积体系以冲积扇—扇三角洲相—湖泊为主(陈宣华等, 2011)。第四系以上更新统和全新统为主,研究区中部为上更新统冲洪积相(Q_{p3}^{pl})的砂砾、砂土,南部为上更新统湖积相(Q_{p3}^l)含石膏的粉砂、粉砂黏土、黏土淤泥,化学沉积相(Q_{p3}^{ch})含粉砂的石盐、粉砂石盐、含石膏粉砂之石盐以及全新统化学沉积相(Q_h^{ch})含粉砂的石盐、粉砂石盐。

钻孔揭露的地层包括下更新统、中更新统和上

更新统,孔隙卤水主要赋存于中下更新统冲洪积相和滨—浅湖相沉积中,储卤层岩性主要以粗砂、砾石、含砾的中粗砂为主,局部夹杂薄层粉砂、细砂、黏土等,隔水层岩性主要为黏土质粉砂和粉砂质黏土。

2 样品及测试分析

2.1 样品采集

卤水多项分析样和同位素分析样采集对象是柴达木盆地北缘赛什腾山前冲洪积扇水文地质钻探施工揭露的砂砾型深层孔隙卤水,钻孔位置见图1a。样品采集于MH01、MH02、MH03、MH04和MH05等5个水文钻孔,将砂砾型深层孔隙卤水含水层作为一个独立单元(200 m以下至孔深),用潜水泵抽至水槽中采集,取样前用所取卤水对采样瓶进行2~3遍清洗,取样结束后及时用胶带将瓶口缠紧密封,并在瓶身贴上标签送至实验室分析。每个钻孔采集卤水多项分析样、H、O同位素样、S同位素样、Li同位素样各1件,每件样品体积不少于500 mL。

2.2 样品测试

卤水多项分析测试由青海省柴达木综合地质矿产勘查院测试中心完成,测试项目有 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 B_2O_3 、 Li^+ 、 Sr^{2+} 、 Br^- 、 I^- 、TDS(溶解固体总量, Total dissolved solids)的质量浓度,密度、pH等。其中 K^+ 、 Na^+ 用180-80原子吸收测定(EM); Ca^{2+} 、 Li^+ 、 Sr^{2+} 用180-80原子吸收测定(AAS); Mg^{2+} 用EDTA容量法; Cl^- 用 $AgNO_3$ 容量法; SO_4^{2-} 用 $BaSO_4$ 重量法; HCO_3^- 根据卤水的不同条件采用酸碱滴定法; B_2O_3 用NaOH容量法; Br^- 、 I^- 用721分光光度法(比色法);密度用波美质量密度仪或采用质量密度瓶测得;pH值用电位计法;溶解性固体总溶质(TDS)用重量法。

卤水H、O、S、Li同位素测试在中国科学院西北生态环境资源研究院地球化学分析测试中心进行。H、O同位素:用高纯氦气对Flash 2000元素分析仪进行冲洗,排除空气,以降低 H_2 及CO本底。当Flash 2000元素分析仪的炉温升高到1400℃,进行样品测试。水与反应管中过量的C发生还原反应,生成供测试用的气体 H_2 及CO。 H_2 及CO在高纯氦气流的带动下,经过色谱柱(5A分子筛不锈钢填充柱)分离后进入质谱仪MAT253进行分析。测量结果以V-SMOW为标准,记为 δD_{V-SMOW} 及 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$,分析精度分别优于 $\pm 1\%$ (1 σ)及 $\pm 0.2\%$

(1 σ)。氢、氧同位素参考标准为IAEA-V-SMOW2($\delta D_{V-SMOW} = 0$; $\delta^{18}O_{V-SMOW} = 0$)、GBW04402($\delta D_{V-SMOW} = -64.8\%$; $\delta^{18}O_{V-SMOW} = -8.79\%$)及GISP($\delta D_{V-SMOW} = -189.5\%$; $\delta^{18}O_{V-SMOW} = -24.76\%$)。

S同位素:将含有不超过100 μg 硫的样品和3倍于样品的 V_2O_5 包在一个小锡舟里,自动进样系统每次投入燃烧反应器中的一个锡舟,通入5 mL的纯氧气,使样品在1020°下燃烧,燃烧产生的所有气体在氦载气流下带入并通过分层充填 W_2O_5 、CuO和Cu丝的氧化还原反应器,使所有气体充分氧化,同时使生成的少量 S_2O_3 通过Cu丝层时还原为 SO_2 。气体通过一根色谱柱将 SO_2 和其他杂质气体分开后进入质谱仪测试硫化物及硫酸盐的硫同位素分析。测试过程中采用IAEA-SO-5、IAEA-SO-6和NBS127 3种国际标准物质作为参考。结果以相对国际标准V-CDT的 $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 值来表示:

$$\delta^{34}S_{V-CDT} = \left\{ \frac{[n(^{34}S)/n(^{32}S)]_{\text{样品}}}{[n(^{34}S)/n(^{32}S)]_{V-CDT}} - 1 \right\} \times 1000\%$$

基于对标准样品的重复测试, $\delta^{34}S$ 的分析精度为0.1‰。

Li同位素:采用8 mL容积(树脂体积)离子交换柱,以AG 50W-X12为阳离子交换树脂,以0.5 mol/L HNO_3 为淋洗液,上样量2 mL(Li总量400 ng)过柱,收集淋洗区间的淋洗液,并用ICP-MS检测分离效果,确保 $Na/Li < 1$,以达到MC-ICP-MS测试要求。测试过程采用标准—样品交叉法(SSB法)进行测试,即在每个样品的前后都间插测定一个Li同位素的国际标样(NIST提供的L-SVEC, Li_2CO_3),测试结果按照公式计算所得:

$$\delta^7Li = \left\{ \frac{[n(^7Li)/n(^6Li)]_{\text{样品}}}{[n(^7Li)/n(^6Li)]_{L-SVEC}} - 1 \right\} \times 1000\%$$

其中为 $[n(^7Li)/n(^6Li)]_{\text{样品}}$ 为样品的测定值, $[n(^7Li)/n(^6Li)]_{L-SVEC}$ 为与样品相邻的标样的两次测定值的平均值。其测试结果为2~3次测定结果的平均值。

3 分析结果

3.1 卤水地球化学

3.1.1 水化学特征

研究区卤水矿化度为133.32~271.63 g/L(表1),平均矿化度200.34 g/L,卤水pH值在6.9~7.3,呈弱碱性;卤水密度在1.072~1.177 g/cm³,平均值为1.130 g/cm³,属中—低矿化度不饱和卤水。

表 1 柴北缘马海地区砂砾型深层孔隙卤水水化学组成

Table 1 The chemical composition of deep pore brine of sand—gravel type in Mahai area, northern margin of Qaidam Basin

样号	取样位置 (m)	质量浓度 ρ (g/L)							pH 值	质量浓度 ρ (mg/L)						密度 ($\frac{g}{cm^3}$)	
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	TDS		B ₂ O ₃	Li ⁺	Sr ²⁺	NO ₃ ⁻	I ⁻	Br ⁻		HCO ₃ ⁻
MH05 ST01	200~957.50	1.77	78.39	5.28	5.96	1.88	149.7	243.0	7.2	34.75	3.24	84.26	14.34	9.57	40.51	22.12	1.157
MH04 ST01	200~1435.16	2.84	86.10	5.62	7.91	1.59	167.6	271.6	7.1	37.74	4.30	76.12	15.33	6.44	39.80	25.82	1.177
MH03 ST01	200~1155.58	0.92	35.55	2.37	2.72	1.86	65.96	109.4	7.3	24.38	2.55	44.36	9.59	3.28	27.39	26.91	1.072
MH02 ST01	200~1406.91	2.28	80.49	3.02	6.90	2.18	149.5	244.4	6.9	425.6	4.45	53.53	15.06	4.78	36.93	7.20	1.159
MH01 ST01	200~1212.04	0.76	42.09	3.36	3.81	1.76	81.55	133.3	7.0	23.31	2.45	61.85	9.28	4.60	35.37	51.68	1.088

表 2 柴北缘马海地区砂砾型深层孔隙卤水特征系数一览表

Table 2 The characteristic factors of deep pore brine of sand—gravel type in Mahai area, northern margin of Qaidam Basin

样品编号	钾系数	钾氯系数	镁氯系数	钠氯系数	溴氯系数	脱硫系数	钙镁系数
MH05SD01	7.26	11.79	3.98	0.81	0.27	0.02	0.54
MH04SD01	10.46	16.95	4.72	0.79	0.24	0.01	0.43
MH03SD01	8.44	14.00	4.12	0.83	0.42	0.04	0.53
MH02SD01	9.32	15.23	4.62	0.83	0.25	0.02	0.27
MH01SD01	5.68	9.29	4.67	0.80	0.43	0.03	0.53

Piper 图解上,所有样品阳离子落在(Na⁺+K⁺)端,阴离子落在偏向Cl⁻端,因此,水化学类型为Cl⁻—Na⁺型(图2)。根据瓦里亚什科水化学分类方法,样品为氯化物型卤水。

根据本研究测试的K⁺质量浓度[$\rho(K^+)$]在(0.76~2.28 g/L)和已报道的该区域同类型卤水样品中 $\rho(K^+)$ (1.12~3.65 g/L, Fan Qishun et al., 2024),可以看出其钾资源基本达到了综合评价指标。而 $\rho(Na^+)$ 在35.55~86.10 g/L,均超过了边界品位,且大部分超过了最低工业品位。 $\rho(Ca^{2+})=2.37\sim 5.62$ g/L, $\rho(Mg^{2+})=2.72\sim 7.91$ g/L, $\rho(Cl^-)=65.96\sim 167.56$ g/L, $\rho(SO_4^{2-})=65.96\sim 167.56$ g/L, $\rho(HCO_3^-)=7.20\sim 51.68$ g/L。在常量元素阳离子中Na⁺占绝对主要地位,K⁺占比最小。常量元素阴离子中Cl⁻占主导地位,HCO₃⁻含量次之,但相比Cl⁻来说含量甚少,SO₄²⁻含量最少。

微量元素主要为Li⁺、B₂O₃、Br⁻、I⁻、Sr²⁺,其中 $\rho(Li^+)=2.45\sim 4.45$ mg/L,远低于边界品位, $\rho(B_2O_3)=24.38\sim 425.59$ mg/L,仅MH02钻孔的样品 $\rho(B_2O_3)=425.59$ mg/L,达到了边界品位,其余远低于边界品位。 $\rho(Br^-)=27.69\sim 40.51$ mg/L,略低于综合评价指标(50~60 mg/L)。 $\rho(I^-)=3.28\sim 9.57$ mg/L,也低于综合评价指标(15~20 mg/L),

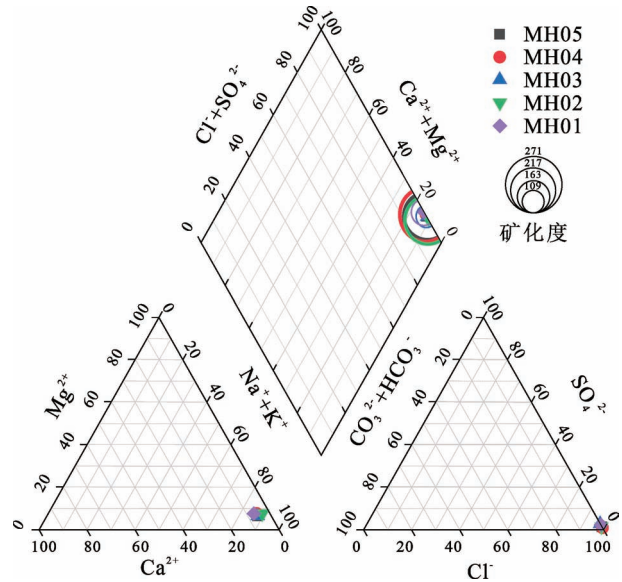


图 2 卤水水化学三线 Piper 图

Fig. 2 Piper diagram of water chemistry of brine

图中各离子的计量是其质量浓度(mg/L)

The measurement of each ion in the figure is its mass concentration (mg/L)

$\rho(Sr^{2+})$ 普遍较低, $\rho(Sr^{2+})=44.36\sim 84.26$ mg/L。

3.1.2 离子特征系数

离子特征系数包括钠氯系数、脱硫系数、钙镁系

数和钾系数、钾氯系数、镁氯系数、溴氯系数,前三者为当量浓度比值,后四者为质量浓度比值。

研究区卤水的钾系数 $[1000 \rho(K^+)/\rho(\Sigma \text{盐})]$, Σ 盐为总矿化度]在 5.68~10.46, 钾氯系数 $[1000\rho(K^+)/\rho(Cl^-)]$ 在 9.29~16.95, 镁氯系数 $[100 \rho(Mg^{2+})/\rho(Cl^-)]$ 在 3.98~4.72, 钠氯系数 $[\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)]$ 在 0.79~0.83, 溴氯系数 $[\rho(Br^-)/\rho(Cl^-)]$ 在 0.24~0.43, 脱硫系数 $\{\gamma(SO_4^{2-})/[\gamma(SO_4^{2-})+\gamma(Cl^-)]\}$ 在 0.01~0.04, 钙镁系数 $[\gamma(Ca^{2+})/\gamma(Mg^{2+})]$ 在 0.27~0.54(表 2)。

3.2 卤水稳定同位素

研究区卤水的 δD 值在 $-63.59\text{‰} \sim -31.79\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 值在 $-7.06\text{‰} \sim -0.81\text{‰}$, δD 值相对变化较 $\delta^{18}O$ 值要小。 $\delta^{34}S$ 值分布在 $12.02\text{‰} \sim 16.57\text{‰}$ 。 δ^7Li 值分布在 $24.18\text{‰} \sim 44.50\text{‰}$, 平均 δ^7Li 值为 35.68‰ , 整体偏正且偏正幅度较大(表 3)。

表 3 柴北缘马海地区砂砾型深层孔隙卤水 H、O、S、Li 同位素特征

Table 3 The characteristics of H, O, S, Li isotope of deep pore brine of sand—gravel type in Mahai area, northern margin of the Qaidam Basin

样品编号	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ (‰)	δD_{V-SMOW} (‰)	$\delta^{34}S_{V-CDT}$ (‰)	δ^7Li (‰)
MH05ST01	-1.97	-36.49	15.49	31.85
MH04ST01	-0.81	-31.79	16.57	39.95
MH03ST01	-6.77	-63.08	12.02	37.90
MH02ST01	-0.99	-32.41	15.56	44.50
MH01ST01	-7.06	-63.59	15.25	24.18

4 讨论

4.1 数据分析

4.1.1 离子成分相关性

离子特征系数可判别卤水成因类型、浓缩阶段、沉积环境等特征。

正常海水钠氯系数 $[\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)]$ 平均值为 0.85~0.87, 溴氯系数 $[\rho(Br^-)/\rho(Cl^-)]$ 约为 3.4。岩溶地下卤水钠氯系数大于或者接近 1, 蒸发残余地下卤水一般小于 0.85(岳鑫等, 2019; 李洪普等, 2022)。溴氯系数 <1.0 时, 为岩盐溶滤型卤水(李建森等, 2013)。研究区卤水的钠氯系数分布范围为 0.79~0.83, 小于 0.85, 反映其来源为蒸发残余的地下卤水, 溴氯系数在 0.24~0.43, 反映盐岩溶滤的来源。

钾系数 $[1000(\rho(K^+)/\rho(\Sigma \text{盐}))]$ 和钾氯系数 $[1000\rho(K^+)/\rho(Cl^-)]$ 反映卤水的富钾性。地下水溶滤石盐时钾系数小于 5, 钾氯系数小于 10; 溶滤含钾石盐时钾系数为 5~10, 钾氯系数为 10~20(樊启顺等, 2007; Li Qingkuan et al., 2019)。研究区钾系数值为 5.68~10.46, 除 MH01SD01 样品的钾氯系数为 9.29 外, 其他 4 个样品的值为 11.79~16.95, 表明该深部卤水存在溶解部分古盐层中钾盐的可能性。

脱硫系数 $\{\gamma(SO_4^{2-})/[\gamma(SO_4^{2-})+\gamma(Cl^-)]\}$ 是判断卤水形成环境的重要指标, 当地层封闭条件较好时, 硫酸盐在还原环境下发生分解, 导致 SO_4^{2-} 含量减少(李雯霞等, 2016)。因此, 将脱硫系数值等于 1.0 作为脱硫作用彻底与否的界限值。脱硫系数小于 1 且越接近 0, 表明地层水还原彻底, 封闭性好(周训等, 2015); 其值大于 1.0 则表明还原不彻底, 可能受浅表层氧化作用的影响(韩佳君等, 2013)。研究区脱硫系数在 0.01~0.04, 远小于 1, 说明卤水的脱硫作用强, 这与卤水长期在相对封闭的还原环境中储存关系密切。

钙镁系数 $[\gamma(Ca^{2+})/\gamma(Mg^{2+})]$ 反映地下卤水变质程度, 封闭时间越长, 封闭性越好, 变质程度越高, 该值越高。研究区钙镁系数在 0.27~0.54, 明显低于 3(周训等, 2015), 这可能与残余蒸发的硫酸盐水体发生正向变质作用有关, 从而导致 Ca^{2+} 大量减少和 Mg^{2+} 大量增加, 即(岳鑫等, 2019; 刘溪溪等, 2020):



研究区卤水水化学类型为氯化物型, 向湖积中心过渡为硫酸镁亚型(马金元等, 2010; 汤玉兰, 2015; Hu Shuya et al., 2019)。

镁氯系数 $[100\rho(Mg^{2+})/\rho(Cl^-)]$ 反映卤水的浓缩程度, 石盐和钾盐层溶滤卤水的镁氯系数一般小于 0.16, 只有在溶解光卤石和其他含镁硫酸盐型钾盐时, 镁氯系数才有可能大于 0.16(李洪普等, 2022)。研究区样品镁氯系数为 3.98~4.72, 说明样品所代表的水体经历了较高级别的蒸发浓缩过程。

4.1.2 氢、氧同位素

氢、氧同位素特征在研究地下水体的演化过程、揭示地下水体的来源演化具有重要的指示意义(Burnett et al., 2006; Julie et al., 2009; Han Guang et al., 2023)。研究区卤水氢、氧同位素数据与全球大气降水线(GML) $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ (Craig, 1961)和马海盆地大气降水线(朱谱成, 2015)相比(图

3), 发生了正偏移。

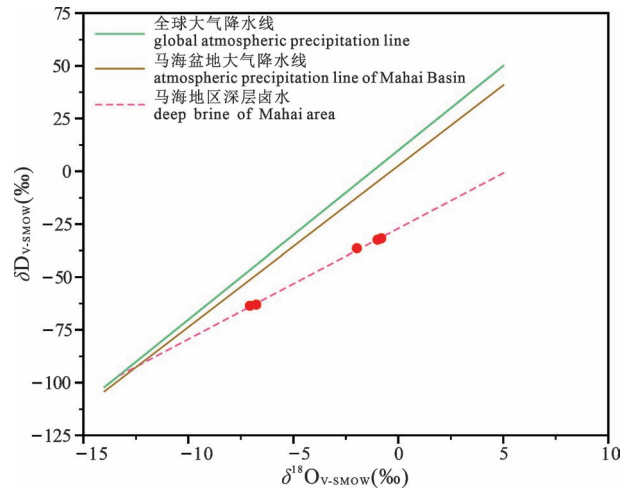


图3 柴北缘马海地区卤水氢、氧同位素分布

Fig. 3 Distribution of hydrogen and oxygen isotope of brine in Mahai area, northern margin of Qaidam Basin

标准海水的 $\delta D = 0, \delta^{18}O = 0$; 大气降水的同位素组成变化很大, δD 值的变化范围为 $-500‰ \sim 50‰$, $\delta^{18}O$ 值的变化范围为 $0 \sim 10‰$ 。研究区卤水氢、氧同位素拟合曲线 ($\delta D = 5.23 \delta^{18}O - 27.05$) 与马海盆地大气降水线和全球大气降水线相比发生了偏移, 而与柴达木盆地内湖表卤水拟合曲线 ($\delta D = 5.0 \delta^{18}O - 25$) (李玉文, 2018) 和罗布泊地区天然水体拟合曲线 ($\delta D = 4.7 \delta^{18}O - 26$) (李建森等, 2022) 接近, 体现了极端干旱环境下水体进入封闭湖盆经受强蒸发作用。

4.1.3 硫同位素

自然界中, 硫同位素分馏的影响因素较多, 包括细菌硫酸盐还原、热化学还原、蒸发浓缩矿物沉淀及体系的开放与封闭等 (Thode et al., 1965; Holser et al., 1966; Raab et al., 1991)。不同地质体及不同硫源的硫同位素组成差别较大 ($-65‰ \sim 120‰$) (Hoefs, 2002), 因此, 硫同位素是灵敏的物源及地球化学过程示踪指标。已有的研究报道显示现代浅表层盐湖卤水的 $\delta^{34}S$ 值介于 $6.66‰ \sim 19.9‰$, 如罗布泊盐湖卤水的 $\delta^{34}S$ 值在 $7.4‰ \sim 12.5‰$ (刘成林等, 1999; 焦鹏程等, 2006)、察尔汗盐湖卤水 $\delta^{34}S$ 值为 $6.66‰ \sim 12.14‰$ (李庆宽, 2016)、昆特依卤水的 $\delta^{34}S$ 值为 $17.3‰ \sim 19.9‰$ (王弭力等, 1997)。而柴达木盆地西部砂砾型深层卤水和古近系—新近系硫酸盐 $\delta^{34}S$ 值分布范围分别为 $22.7‰ \sim 26.8‰$ (李洪普等, 2022)、 $20.84‰ \sim 39.2‰$ (葛文胜等, 2001;

赵加凡等, 2005; 郑希民等, 2019; 陈启林等, 2019) (图4)。

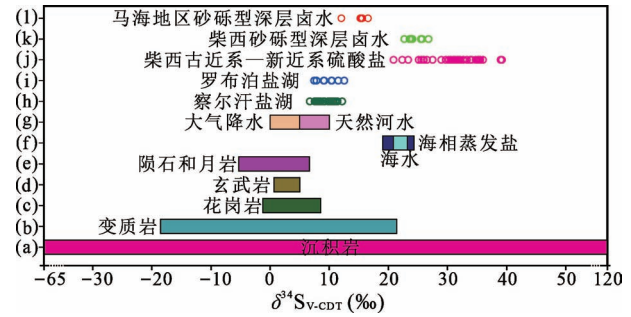


图4 不同水体和岩体 $\delta^{34}S$ 值分布图

Fig. 4 The $\delta^{34}S$ values in different water and rocks

(a) — (g) 据 Hoefs (2002); (h) 据李庆宽 (2016); (i) 据刘成林等 (1999); (j) 据葛文胜等 (2001)、赵加凡等 (2005)、陈启林等 (2019)、郑希民等 (2019); (k) 源据李洪普等 (2022); (l) 为本文
(a) — (g) from Hoefs (2002); (h) from Li Qingkuan (2016); (i) from Liu Chenglin et al. (1999); (j) from Ge Wensheng et al. (2001), Zhao Jiafan et al. (2005), Chen Qilin et al. (2019), Zheng Ximin et al. (2019); (k) from Li Hongpu et al. (2022); (l) this paper

$\delta^{34}S$ 值趋于在较封闭的环境中富集, 地质环境越封闭, 水岩作用越强, 还原作用越强, 越有利于 $\delta^{34}S$ 的富集 (张江华等, 2009; 任坤等, 2021), SO_4^{2-} 含量越低, 这与研究区卤水贫 SO_4^{2-} 一致。同一物质来源的湖水硫酸盐在不同还原作用下会导致硫同位素值的差异 (樊启顺等, 2009; Fan Qishun et al., 2018)。硫酸盐的还原作用主要包括 2 类: ① 硫酸盐无机还原为硫化物的过程; ② 微生物 (细菌) 引起的硫酸盐还原作用。其中, 硫酸盐无机还原导致的硫同位素动力学分馏效应比较明显, 但只有在 $250^\circ C$ 以上才能由还原剂还原硫酸盐 (王春连等, 2013), 研究区卤水水温不超过 $25^\circ C$, 很显然此过程在研究区发生的可能性较小。

本研究中深层孔隙卤水的 $\delta^{34}S$ 值 ($12.02‰ \sim 16.57‰$) 高于罗布泊和察尔汗现代浅表层盐湖卤水, 而低于柴西昆特依卤水、砂砾型深层孔隙卤水及古地层固体硫酸盐。相对于现代盐湖浅表层卤水而言, 本研究中的深层孔隙卤水储层环境具有相对较好的封闭性, 卤水及储层之间的水岩反应及还原作用较强, 导致其富集相对较高的 $\delta^{34}S$ 值。相对西部的卤水、砂砾型深层孔隙卤水及古地层固体硫酸盐样品的 $\delta^{34}S$ 而言, 由于马海盆地相对西部具有更多

的地表径流补给,同时盆地的东部大气降水相对较多。而大气降水的 $\delta^{34}\text{S}$ 值普遍在 $0\sim 10\text{‰}$ (Holser et al., 1966),当大气降水沿山前向下渗流与卤水混合时,导致 $\delta^{34}\text{S}$ 值降低。另一方面,最新的研究发现柴北缘古近系地层硫酸盐(石膏)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值较低(8.65‰ , $n=1$,数据未发表,另文讨论),导致地下水溶滤古盐层的过程中,卤水 $\delta^{34}\text{S}$ 值偏低。总之,本研究中深层卤水的 $\delta^{34}\text{S}$ 特征表明,柴北缘深层孔隙卤水是一种储存在相对封闭的环境下,受到大气降水淋滤古近系地层硫酸盐后掺杂补给的水体。

4.1.4 锂同位素

锂是一种碱金属元素,在水溶液中较稳定,形成的锂盐易溶于水(Lyons et al., 1997; Witherow et al., 2010)。 Li^+ 易吸附于黏土矿物表面,也可以通过类质同象替换 Mg^{2+} 而进入富镁黏土矿物(如蒙脱石和绿泥石)的结构八面体位,或作为可交换阳离子吸附于层间(Williams et al., 2005; Steinhöfel et al., 2021; 吕苑苑等, 2014, 2024)。多数的锂同位素分馏发生在地表或近地表的低温水—岩作用过程中,且 ^6Li 总是优先保存在固相中,特别是黏土矿物,而 ^7Li 优先保存在液相中(肖应凯等, 1993),因此,锂同位素具有良好的地球化学示踪作用。

研究区卤水的 $\delta^7\text{Li}$ 值分布在 $24.18\text{‰}\sim 44.50\text{‰}$,平均为 35.68‰ ,与柴达木盆地河水 $\delta^7\text{Li}$ 值($11.34\text{‰}\sim 18.37\text{‰}$)和泉水的 $\delta^7\text{Li}$ 值($4.33\text{‰}\sim 20.33\text{‰}$)(He Maoyong et al., 2020; Li Jiansen et al., 2021)相比明显偏高(图5)。卤水中Li可能来源于早期沉积物的溶解、深部裂隙地下水(油田卤

水、温泉等)、富Li岩石的低温风化作用和淡水的多重混合作用(He Maoyong et al., 2020)。

Li同位素分馏程度与温度呈负相关(Wunder et al., 2006; Millot et al., 2010)。流体的 $\delta^7\text{Li}$ 值在低温下相对较高,而在高温下则相对较低。因此,河水中锂含量低, $\delta^7\text{Li}$ 值高,而深部热液的锂含量高, $\delta^7\text{Li}$ 值低(Yu Xiaocan et al., 2024),这也解释了柴达木盆地油田卤水(Li^+ 含量在 $0.13\sim 237.50\text{ mg/L}$,平均值为 70.74 mg/L ; $\delta^7\text{Li}$ 值在 $0.9\text{‰}\sim 33.8\text{‰}$,平均值为 17.05‰)(Li Jiansen et al., 2021; 许建新等, 2023)和江汉盆地油田卤水(Li^+ 含量在 $7.10\sim 97.85\text{ mg/L}$,平均值为 36.29 mg/L ; $\delta^7\text{Li}$ 值在 $10.2\text{‰}\sim 21.9\text{‰}$,平均值为 17.59‰)(Yan Kai et al., 2023)高锂低 $\delta^7\text{Li}$ 的特征。研究区卤水呈现出高 $\delta^7\text{Li}$ 低锂特征,继而排除了深部来源的可能性。

由于锂是亲石元素,在岩浆结晶过程中形成富含锂的岩浆岩,赛什腾山花岗岩、片麻状花岗岩、石英闪长岩中锂含量明显高于克拉克值(彭璇等, 2022; 王盼龙等, 2023),大气降水渗入风化的富Li岩石,携带Li成为地表水下渗,古近系—新近系湖相沉积地层黏土矿物含量丰富,如蒙脱石、伊利石等(田继先等, 2022),地表水流经该套地层时,原本稀缺的Li被黏土矿物吸附,导致Li进一步耗尽、难以富集。同时,在低温水—岩作用过程中, ^6Li 优先进入固相, ^7Li 优先进入液相,导致了卤水 $\delta^7\text{Li}$ 值的急剧增加(Li Jiansen et al., 2021; He Maoyong et al., 2020),这与Scholz等(2010)的研究相一致,即 $\delta^7\text{Li}$ 与Li的含量存在负相关性:

$$\frac{\delta^7\text{Li}}{\text{‰}} = -6.0 (\pm 0.3) \times \ln \left[\frac{C(\text{Li})}{(\mu\text{mol/L})} \right] + 51 (\pm$$

1.2)

结合以上,认为研究区卤水中 Li^+ 的来源主要以富Li岩石风化为主,在地下水运移过程中受黏土矿物吸附的影响,呈现出高 $\delta^7\text{Li}$ 低锂的特征。因此,本研究中卤水样品的 $\delta^7\text{Li}$ 特征表明,卤水的原始溶液主要源自基岩区域的大气降水形成地表径流,流经细土平原区后改为地下水形式补给给研究区。

4.2 成因探讨

柴达木盆地自中生代形成以来,受始新世末期印度板块和欧亚板块碰撞的影响,在渐新世由断陷盆地转化为拗陷盆地,在盆地西部形成了柴达木古湖。从渐新世开始至晚更新世,柴达木湖经历了发生发展、稳定沉降和收缩衰亡(张彭熹等, 1987),上新世末和中更新世末的两次构造运动,使统一的

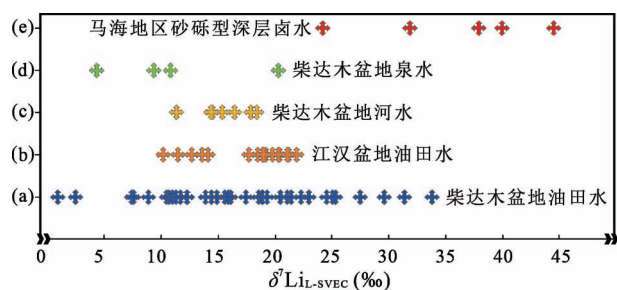


图5 不同水体 $\delta^7\text{Li}$ 值分布图

Fig. 5 The $\delta^7\text{Li}$ values in different water

(a) 据 Li Jiansen 等 (2021), 徐建新等 (2023), Li Yongshou 等 (2024); (b) 据 Yan Kai 等 (2023); (c)(d) 据 He Maoyong 等 (2020) 和 Li Jiansen 等 (2021); (e) 本文

(a) From Li Jiansen et al. (2021), Xu Jianxin et al. (2023&), Li Yongshou et al. (2024); (b) from Yan Kai et al. (2023); (c) (d) from He Maoyong et al. (2020), Li Jiansen et al. (2021); (e) this paper

柴达木古湖分解为几个次级盆地,而马海盐湖就是柴达木古湖分解的产物。尕斯库勒、昆特依等地区的砂砾型深层孔隙卤水中,柴达木盆地古湖水的蒸发浓缩是盐类物质的主要来源之一(刘溪溪等, 2020; 岳鑫等, 2021)。马海地区在中更新世末期,受西南部冷湖六、七号构造隆起的影响,隔断了马海盆地与柴达木盆地的水力联系,使马海成为闭流盆地,具备了良好的封闭性,作为柴达木盆地众多次级盆地之一,无疑继承了柴达木盆地的古湖水(汤玉兰, 2015; 崔庆岗等, 2019; 岳鑫等, 2019)。

根据本研究中对深层砂砾孔隙卤水基本水化学特征及同位素组成特征的分析,可以初步揭示柴北缘马海地区更新统砂砾型深层孔隙卤水的成因。其中,离子特征系数(钠氯系数和钙镁系数)、 δD 、 $\delta^{18}O$ 同位素特征等参数均表明该类型卤水经历了强烈的蒸发浓缩过程,而脱硫系数及 $\delta^{34}S$ 值反映出其储存环境为封闭的还原环境;其溴氯系数、钾系数、钾氯系数及 $\delta^{34}S$ 值,都表明该卤水具有淋滤古盐层中含钾石盐、硫酸盐等蒸发盐矿物的特征。综合 $\delta^{34}S$ 和 δ^7Li 特征来看,该卤水最早起源于基岩山区大气降水富集成地表径流,而后在细土平原区改为地下水的形式,潜流至末端盐湖区。

综上所述,柴北缘马海地区砂砾型深层孔隙卤水具有典型的多阶段、多空间演化的特征。初始阶段,来自基岩山区的大气降水与与风化的基岩碎屑和部分古含盐沉积地层,分别发生“水—岩反应”和“溶滤作用”,并汇聚形成地表径流,将其中的K和Li等元素运载至下游。然后,在中下游细土平原区转为地下水形式潜流至末端盐湖区,期间,含盐风化碎屑及黏土矿物,进一步与地下水发生“水—岩反应”“溶滤作用”及“吸附作用”,从而富集K、Na等易溶盐湖资源元素,而损耗Li资源。而后在终间盐湖区以地表径流或泉水的形式富集,接受长时期的蒸发浓缩过程,并随着沉积物不断沉积,以及浓缩的卤水不断下渗,在上覆沉积层的巨大压力下,储卤介质的孔隙越来越小,迫使古湖水向山前压力小的砂砾石层运移并储存下来。由于山前巨厚的砂砾石型深度较大,卤水表现出其相对封闭还原环境的特征。因此,该卤水一方面表现除大气降水淋滤古盐岩的特征,另一方面表现为残余的古湖水特征。

5 结论

(1)柴北缘马海地区砂砾型深层孔隙卤水为氯化物型的中—低矿化度不饱和卤水,其 K^+ 、 Na^+ 的质

量浓度较高,整体达到了综合评价指标,具有良好的资源前景。

(2)柴北缘马海地区砂砾型深层孔隙卤水的离子特征系数及同位素组成表明该卤水具有明显的盐岩溶滤、黏土吸附、强蒸发浓缩、封闭还原环境储存等特征。

(3)柴北缘马海地区砂砾型深层孔隙卤水矿床,主要是由大气降水通过“水—岩反应”“溶滤作用”“吸附作用”及“蒸发浓缩”等一系列地质作用的产物。在终间盐湖与山前冲洪积扇过渡区,随着上覆地层压力的不断增大,残余的古湖水向山前压力小的砂砾石层运移,最终渗流至深部砂砾层,在相对封闭的条件下形成了砂砾型深层孔隙卤水矿床。

致谢: 特别感谢东华理工大学杨立飞博士和西北大学樊海龙博士对本文的审阅并提出建设性意见。取样过程中得到了青海地质调查局马英、时珍、李向军的帮助,在此深表谢意。中国科学院青海盐湖研究所的陆涛博士协助绘制了部分图件,谨致谢忱!

注释 / Note

① 张晓冬, 杨晓龙, 吴琼, 朱杰君, 韩光, 陈金牛, 范增林. 2021. 青海省茫崖市马海地区深层卤水钾矿预查报告. 格尔木: 青海省柴达木综合地质矿产勘查院.

参考文献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 陈启林, 张小军, 黄成刚, 李翔. 2019. 柴达木盆地英西地区渐新统硫酸盐同位素组成及其地质意义. 地质论评, 65(3): 558~572.
- 陈宣华, Michael W. MCRIVETTE, 李丽, 尹安, 蒋荣宝, 万景林, 李会军. 2011. 东昆仑造山带多期隆升历史的地质热年代学证据. 地质通报, 30(11): 1647~1660.
- 崔庆岗, 赵淑芳. 2018. 柴达木盆地马海盐湖的盐壳特征及其地质意义. 化工矿产地质, 40(4): 218~226.
- 崔庆岗, 侯新星, 来永伟, 赵淑芳, 魏斌. 2019. 柴达木盆地宗马海湖地区钾盐矿床成矿规律与成矿预测研究. 山东国土资源, 35(10): 17~25.
- 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 许建新, 李廷伟. 2007. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨. 地球化学, 36(6): 601~611.
- 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 李廷伟. 2009. 柴达木盆地西部油田卤水的硫同位素地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报, 28(2): 137~142.
- 葛文胜, 蔡克勤. 2001. 柴达木盆地西北部锃矿成矿系统研究. 现代地质, 15(1): 53~58+117.
- 韩光, 樊启顺, 许建新, 潘彤, 刘久波, 袁文虎, 董启伟. 2022. 柴达木盆地西部鄂博梁II号构造深层卤水储层特征与锂硼资源富集成因. 盐湖研究, 30(2): 70~78.

- 韩佳君,周训,姜长龙,胡良君,方斌,孙琦.柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及其起源演化.现代地质,27(6):1454~1464.
- 韩校立.2017.柴达木盆地黑北凹地新型砂砾型含钾卤水成因研究.导师:郑绵平.北京:中国矿业大学(北京)博士学位论文:1~113.
- 何照,张西营,黄聿铭,马海洲,李永寿,苗卫良,于晨光.2016.柴达木盆地北部新生代构造运动及其对盐湖演化的影响.盐湖研究,24(1):1~7.
- Hoefs J. 2002. 稳定同位素地球化学. 北京:海洋出版社:1~357.
- 焦鹏程.2006.罗布泊盐湖钾盐矿床形成的地球化学研究.矿床地质,25(S1):225~228.
- 焦鹏程,张建伟,姚佛军,赵龙.2016.马海盐湖深部卤水钾盐勘查与研究进展.矿床地质,35(6):1305~1308.
- 李洪普.2021.柴达木盆地深层卤水成矿与利用研究.武汉:中国地质大学出版社:66~68.
- 李洪普,侯献华,郑绵平,樊馥,刘溪溪,王淑丽.2022.柴达木盆地西部更新统砂砾型深层卤水钾矿成矿模式与找矿方向探讨.湖泊科学,34(3):1043~1054.
- 李建森,李廷伟,马海州,彭喜明.2013.柴达木盆地西部新近系和古近系油田卤水水化学特征及其地质意义.水文地质工程地质,40(6):28~36.
- 李建森,蔡进福,樊启顺,山发寿,凌智永,韩元红,张永兴.2022.柴达木盆地盐湖K、B、Li资源的成矿地球化学系统.盐湖研究,30(3):12~20.
- 李庆宽.2016.察尔汗盐湖卤水硫同位素地球化学特征及影响因素.导师:山发寿,樊启顺.青海:中国科学院大学(青海盐湖研究所)硕士学位论文:1~53.
- 李雯霞,张西营,苗卫良,李永寿,唐启亮,王波,李园,朱广琴.2016.柴达木盆地北缘冷湖三号构造油田水水化学特征.盐湖研究,24(2):12~18.
- 李玉文.2018.柴达木盆地昆特依盐湖富钾卤水地球化学特征及成因.导师:山发寿.青海:中国科学院大学(青海盐湖研究所)硕士学位论文:1~53.
- 刘成林,王弭力,焦鹏程.1999.新疆罗布泊盐湖氢氧锶硫同位素地球化学及钾矿成矿物质来源.矿床地质,18(3):268~275.
- 刘卫国,肖应凯,孙大鹏,周引民,王庆忠.1995.马海盐湖卤水和盐类矿物的氯同位素特征及意义.盐湖研究,3(2):29~33.
- 刘溪溪,岳鑫,于小亮,马喆,路亮,张晓冬,马宗德.2020.柴达木盆地西北缘昆特依凹陷的双层钾盐成矿模式特征及成因.湖泊科学,32(1):246~258.
- 刘颖.2018.柴达木盆地黑北凹地深层卤水钾资源利用研究.导师:王云生.北京:中国地质大学(北京)硕士学位论文:1~69.
- 龙鹏宇,赵艳军,胡宇飞,杜江民,何继辉,王朝旭.2022.马海盐湖北部矿段低品位固体钾矿中钾盐矿物的赋存特征及成因探讨.地球学报,43(3):338~346.
- 陆松年,王惠初,李怀坤,袁桂邦,辛后田,郑健康.2002.柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定.地质通报,21(1):19~23.
- 陆松年,陈志宏,李怀坤,郝国杰,周红英,相振群.2004.秦岭造山带中—新元古代(早期)地质演化.地质通报,23(2):107~112.
- 吕苑苑,郑绵平.2014.盐湖硼、锂、锶、氯同位素地球化学研究进展.矿床地质,33(5):930~944.
- 吕苑苑.2024.青藏高原盐湖硼、锂同位素变化规律及其对当雄错盐湖资源评价应用.地质力学学报,30(1):107~128.
- 马金元.2005.马海钾矿床北部矿段资源概略评价及开采.中国工程科学,7(4):296~300.
- 马金元,胡生忠,田向东.2010.柴达木盆地马海钾盐矿床沉积环境与开发.盐湖研究,18(3):9~17.
- 潘晓晨,成怀刚,程芳琴.2013.马海盐湖溶采卤水高温梯级蒸发实验研究.无机盐工业,45(6):15~18.
- 彭璇,庄玉军,辜平阳,时超,何世平,曹佰迪.2022.柴北缘小赛什腾山片麻状花岗岩的成因:来自地球化学、锆石U—Pb年代学及Hf同位素约束.西北地质,55(4):221~239.
- 任坤,潘晓东,兰干江,彭聪,梁嘉鹏,曾洁.2021.硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源.环境科学,42(9):4267~4274.
- 任倩慧,高东林,张岩,李斌凯,都永生,刘秀婷.2018.柴达木盆地昆特依盐湖大滩矿区卤水地球化学特征分析.盐湖研究,26(2):34~42.
- 沈振区,童国榜,张俊牌,于淑凤,李银罗.1990.青海柴达木盆地西部上新世以来的地质环境与成盐期.海洋地质与第四纪地质,10(4):89~99.
- 孙非非,张苑漪,巩俊成,张成君.2010.柴达木盆地上新世晚期以来古气候演变的孢粉环境指标重建.地质论评,56(5):621~628.
- 汤玉兰.2015.青海马海盐湖富钾卤水地球化学特征及其成因研究.导师:姚磊华.北京:中国地质大学(北京)硕士学位论文:1~60.
- 田继先,纪宝强,曾旭,王晔桐,李曜良,孙国强.2022.柴北缘下干柴沟组深部碎屑岩储层发育特征及主控因素.天然气地球科学,33(5):720~730.
- 王春连,刘成林,徐海明,王立成,沈立建.2013.湖北江陵凹陷古新统沙市组四段硫酸盐硫同位素组成及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),43(3):691~703.
- 王惠初,陆松年,莫宣学,李怀坤,辛后田.2005.柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统.地质通报,24(7):603~612.
- 王进寿,潘彤,李鹏,田永革,安永蔚,余福承,雷晓清.2022.青海省柴北缘成矿带矿床成矿系列.地球科学与环境学报,44(3):391~412.
- 王弭力,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:1~173.
- 王盼龙,李永军,段丰浩,庄玉军,支倩,辜平阳,高吉鹏,杨高学.2023.柴北缘西段小赛什腾山黑云母二长花岗岩和石英闪长岩岩石成因及其动力学背景:锆石U—Pb年代学、地球化学和Hf同位素约束.地质学报,97(10):3292~3313.
- 魏新俊,姜继学,王弭力.1992.马海钾矿第四纪沉积特征及盐湖演化.青海地质,1(1):40~52.
- 肖应凯,祁海平,王蕴慧,刘卫国,金琳,张崇耿.1993.察尔汗首采区卤水中锂同位素组成.盐湖研究,1(3):52~56.
- 许建新,秦成功,韩积斌,高雪峰,郭斌,赵为永,雷涛,韩光.2023.锂元素及其同位素对南翼山油田卤水形成演化的指示意义.盐湖研究,31(1):11~24.
- 宣之强.1995.青海昆特依和马海盐湖区钾镁盐矿床固体矿的基本特征.盐湖研究,3(4):1~9.
- 袁冶.2015.柴达木盆地冷湖地区晚更新世晚期以来气候特征及对全球气候变化与高原隆升响应.导师:Timothy Kusky,向树元.武汉:中国地质大学博士学位论文:1~119.
- 岳鑫,刘溪溪,路亮,张晓冬,范增林,于小亮.2019.马海盆地深部孔隙卤水矿床水化学特征及成因.沉积学报,37(3):532~540.
- 岳鑫,刘溪溪,仇新迪,于小亮.2021.柴西苏斯库勒地区深部孔隙卤水水化学特征及成因分析.盐湖研究,29(1):69~79.
- 岳悦,孙德有,侯可军,彭银彪.2021.柴北缘乌兰北部三叠纪辉长岩的年代学和地球化学特征.吉林大学学报(地球科学版),51(1):154~168.

- 曾文人, 孟庆涛, 刘招君, 徐银波, 孙平昌, 王克兵. 2019. 柴北缘团鱼山地区中侏罗统石门沟组油页岩有机地球化学特征及古湖泊条件. *吉林大学学报(地球科学版)*, 49(5): 1270~1284.
- 张江华, 梁永平, 王维泰, 韩行瑞, 侯光才. 硫同位素技术在北方岩溶水资源调查中的应用实例. *中国岩溶*, 28(3): 235~241.
- 张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社: 32~40.
- 赵加凡, 陈小宏, 金龙. 2005. 柴达木盆地第三纪盐湖沉积环境分析. *西北大学学报(自然科学版)*, 35(3): 342~346.
- 郑绵平, 侯献华, 于常青, 李洪普, 尹宏伟, 张震, 邓小林, 张永生, 郭廷峰, 韦钊, 王绪本, 安莲英, 乜贞, 谭筱红, 张雪飞, 牛新生. 2015. 成盐理论引领我国找钾取得重要进展. *地球学报*, 152(2): 129~139.
- 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 齐文, 孔凡晶, 乜贞, 贾沁贤, 卜令忠, 侯献华, 王海雷, 张震, 孔维刚, 林勇杰. 2016. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望. *地质学报*, 90(9): 2123~2166.
- 郑希民, 杨柳, 易定红, 王朴. 2019. 柴达木盆地西部古近系石膏及其硫同位素分布特征. *沉积与特提斯地质*, 39(4): 65~70.
- 周训, 曹琴, 尹菲, 郭娟, 王晓翠, 张永帅, 王黎栋, 沈晔. 2015. 四川盆地东部高褶带三叠系地层卤水和温泉的地球化学特征及成因. *地质学报*, 89(11): 1908~1920.
- 朱谱成. 2015. 鱼卡河中下游鱼卡—马海盆地地下水循环模式研究. 导师: 苏小四. 吉林: 吉林大学硕士学位论文: 1~39.
- Burnett W C, Aggarwal P K. 2006. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone Via multiple methods. *Science of the Total Environment*, 367: 498~543.
- Chen Qilin, Zhang Xixiaojun, Huang Chenggang, Li Xiangl. 2019. Sulfur isotopic composition of sulphate in Oligocene series in Yingxi area, Qaidam basin, and its geological significance. *Geological Review*, 65(3): 558~572.
- Chen Xuanhua, Michael W M, Li Li, Yin An, Jiang Rongbao, Wan Jinglin, Li Huijun. 2011. Thermochronological evidence for multi-phase up lifting of the east Kunlun mountains, northern Tibetan Plateau. *Geological Bulletin of China*, 30(11): 1647~1660.
- Craig H. 1961. Isotopic variations in Neteoric waters. *Science*, 133(3465): 1702~1703.
- Cui Qinggang, Zhao Shufang. 2018. The Characteristics and geological significance of ring-shaped salterustin Mahai salt lake of Qaidam basin in Qinghai province. *Geological of Chemical Minerals*, 40(4): 218~226.
- Cui Qinggang, Hou Xinxing, Lai Yongwei, Zhao Shufang, Wei Bin. 2019. Study on metallogenic regularities and metallogenic predication of potassium salt deposit in Zongmahahu area of Qaidam basin in Qinghai province. *Shandong Land and Resources*, 35(10): 17~25.
- Fan Qishun, Lowenstein Tim K, Wei Haicheng, Yuan Qin, Qin Zhanjie, Shan Fashou, Ma Haizhou. 2018. Sr isotope and major ion compositional evidence for formation of Qarhan salt lake, western China. *Chemical Geology*, 497: 128~145.
- Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbing, Xu Jianxin, Li Tingwei. 2007. Characteristics and origin of brines in western Qaidam basin. *Geochimica*, 36(6): 601~611.
- Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbing, Li Tingwei. 2009. Geochemistry characteristics of sulfur isotope in oilfield brine of the western Qaidam basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(2): 137~142.
- Fan Qishun, Han guang, Chen Tianyuan, Bai Hongkui, Liu Jiubo, Miao Qing, Zhang Xiaodong, Yang Haotian, Li Qingkuan. 2024. Inheritance recharge of subsurface brine constrains on formation of K-bearing sand—gravel brine in the alluvial fan zone of mountain—basin system on the Qinghai—Tibet Plateau. *Journal of Hydrology*, 634: 132029.
- Ge Wensheng, Cai Keqin. 2001. Mineralization system of celestite deposits in northwestern Qaidam basin. *Geoscience*, 15(1): 53~58+117.
- Han Guang, Fan Qishun, Xu Jianxin, Pan Tong, Liu Jiubo, Yuan Wenhui, Dong Qiwei. 2022. Characterist of deep brine reservoirs and origin of enrichment of lithium and boron resources in the Eboliang II structure in the western Qaidam basin. *Journal of Salt Lake Research*, 30(2): 70~78.
- Han Guang, Pan Tong, Li Qingkuan, Fan Qishun, Hu Yan, Liu Jiubo, Zhang Xiyi. 2023. Genesis of Neogene formation waters in the central Qaidam basin: Clues from hydrochemistry and stable D—O—S—Sr isotopes. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 97(6): 1801~1813.
- Han Jiajun, Zhou Xun, Jiang Changlong, Hu Liangjun, Fang Bin, Sun Qi. 2013. Hydrochemical characteristics, origin and evolution of the subsurface brines in western Qaidam basin. *Geoscience*, 27(6): 1454~1464.
- Han Xiaoli. 2017. Study on Origin of Potassium-Bearing Brine in Sandy Gravel Bed of Heibei Concave in Qaidam Basin. Supervisor: Zheng Mianping. Beijing: Doctoral dissertation of China University of Mining and Technology (Beijing): 1~113.
- He Maoyong, Luo Chongguang, Yang Hongjun, Kong Fancui, Li Yulong, Deng Li, Zhang Xiyi, Yang Kaiyuan. 2020. Sources and a proposal for comprehensive exploitation of lithium brine deposits in the Qaidam basin on the northern Tibetan Plateau, China: Evidence from Li isotopes. *Ore Geology Reviews*, 117: 103277.
- He Zhao, Zhang Xiyi, Huang Yuming, Ma Haizhou, Li Yongshou, Miao Weiliang, Yu Chenguang. 2016. Cenozoic tectonic movements of the north Qaidam basin and their effects on the evolution of salt lakes. *Journal of Salt Lake Research*, 24(1): 1~7.
- Hoefs J. 2002. Geochemistry of Stable Isotope. Beijing: China Ocean Press: 1~357.
- Holser W T, Kaplan I R. 1966. Isotope geochemistry of sedimentary sulfates. *Chemical Geology*, 1: 93~135.
- Hu Shuya, Zhao Quansheng, Zhang Jianwei, Chen Jianlei. 2019. Analysis of the hydrochemical characteristics and the evolutionary stages of brine in Mahai salt lake in the Qaidam basin. *E3S Web Conf*, 98: 07011.
- Jiao Pengcheng. 2006. Geochemistry of salt lake potash deposits in the Lop Nur, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 25(S1): 225~228.
- Jiao Pengcheng, Zhang Jianwei, Yao Fujun, Zhao Long. 2016. Progress in exploration and research of potash in deep brine of Mahai salt lake. *Mineral Deposits*, 35(6): 1305~1308.
- Julie C G, Christine V C, Adriano M, Christelle C, Olivier R, Enrico C, Bruno H. 2009. Isotopic and geochemical characterization of salinization in the shallow aquifers of a reclaimed subsiding zone: the southern Venice Lagoon soastland. *Journal of Hydrology*, 378: 46~61.
- Li Hongpu. 2021. Mineralization and Utilization of Deep Brine in Qaidam Basin. Wuhan: China University of Geosciences Press: 66~68.
- Li Hongpu, Hou Xianhua, Zheng Mianping, Fan Fu, Liu Xixi, Wang

- Shuli. 2022&. Discussion on metallogenic model and prospecting direction of Pleistocene gravel brine potassium deposit in western Qaidam basin. *Journal of Lake Sciences*, 34(3): 1043~1054.
- Li Jiansen, Li Tingwei, Ma Haizhou, Peng Ximing. 2013&. Investigation of the chemical characteristics and its geological significance of the Tertiary oilfield brine in the western Qaidam basin. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 40(6): 28~36.
- Li Jiansen, Chen Fukun, Ling Zhiyong, Li Tingwei. 2021. Lithium sources in oilfield waters from the Qaidam Basin, Tibetan plateau: geochemical and Li isotopic evidence. *Ore Geology Reviews*, 139: 104481.
- Li Jiansen, Cai Jinfu, Fan Qishun, Shan Fashou, Ling Zhiyong, Han Yuanhong, Zhang Yongxing. 2022&. Metallogenic geochemical system of K, B and Li resources in salt lakes of Qaidam basin. *Journal of Salt Lake Research*, 30(3): 12~20.
- Li Qingkuan. 2016&. The Geochemical Characteristics and Impact Factors of Sulfur Isotope of the Brine in Qarhan Salt Lake. Supervisor: Shan Fashou, Fan Qishun. Qinghai: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences Master Thesis; 1~53.
- Li Qingkuan, Fan Qishun, Wang Jianping, Qin Zhanjie, Shan Fashou. 2019. Hydrochemistry, distribution and formation of lithium-rich brines in salt lakes on the Qinghai—Tibetan plateau. *Minerals*, 9(9): 528.
- Li Wenxia, Zhang Xiyong, Miao Weiliang, Li Yongshou, Tang Qiliang, Wang Bo, Li Yuan, Zhu Guangqin. 2016&. Hydrochemical characteristics of oilfield waters in Lenghu No. 3 structure area of north edge of Qaidam basin. *Journal of Salt Lake Research*, 24(2): 12~18.
- Li Yongshou, Pan Tong, Li Hongpi, Chen Huaide, Zhang Pengcheng, Han Wenhua, Li Binkai, Yuan Qin, Ma Xuehai, Ma Haizhou. 2024. Source and genesis of Ca—Cl type brines in Qaidam basin, Qinghai—Tibetan plateau: evidence from hydrochemistry as well as B and Li isotopes. *Frontiers in Environmental Science*, 11: 1248294.
- Li Yuwen. 2018&. The Geochemical Characteristics and Origin of the Potassium—Rich Brine from Kuntayi Salt Lake in the Qaidam Basin. Supervisor: Shan Fashou. Qinghai: Chinese Academy of Sciences (Qinghai Institute of Salt Lakes) Master Thesis; 1~53.
- 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.
- Liu Weiguo, Xiao Yingkai, Sun Dapeng, Zhou Yinmin, Wang Qinzhong. 1995&. Characteristics and significance of Chlorine isotope of brine and deposits in The Mahai salt lakes. *Journal of Salt Lake Research*, 3(2): 29~33.
- Liu Xixi, Yue Xin, Yu Xiaoliang, Ma Zhe, Lu Liang, Zhang Xiaodong, Ma Zongde. 2020&. Characteristics and genesis of the double potash layer metallogenetic model of Kuntayi depression in the northwest margin of Qaidam basin. *Journal of Lake Sciences*, 32(1): 246~258.
- Liu Ying. 2018&. The Research on Utilization of Potassium in Deep Brine of the Heibei Concave in Qaidam basin. Supervisor: Wang Yunsheng. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) Master Thesis; 1~69.
- Long Pengyu, Zhao Yanjun, Hu Yufei, Du Jiangmin, He Jihui, Wang Zhaoxu. 2022&. Occurrence characteristics and genetic study of potassium salt minerals in low grade solid potassium ore in the north section of Mahai salt lake. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(3): 338~346.
- Lu Songnian, Wang Huichu, Li Huaikun, Yuan Guibang, Xin Houtian, Zheng Jiankang. 2002&. Redefinition of the “Dakendaban Group” on the northern margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 21(1): 19~23.
- Lu Songnian, Chen Zhihong, Li Huaikun, Hao Guojie, Zhou Hongying, Xiang Zhenqun. 2004&. Late Mesoproterozoic—Early Neoproterozoic evolution of the Qinling orogen. *Geological Bulletin of China*, 23(2): 107~112.
- Lv Yuanyuan, Zheng Mianping. 2014&. Progress in study of isotopic geochemistry of boron, lithium, strontium and chlorine in salt lakes. *Mineral Deposits*, 33(5): 930~944.
- Lv Yuanyuan. 2024&. Variation patterns of boron and lithium isotopes in salt lakes on the Qinghai—Tibetan plateau and their application in evaluating resources in the Damxung Co salt lake. *Journal of Geomechanics*, 30(1): 107~128.
- Lyons W B, Welch K A. 1997. Lithium in waters of a polar desert. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(20): 4309~4319.
- Ma Jinyuan. 2005&. Outline evaluation and exploitation of resources in northern segment of Mahai potassium deposit. *Engineering Science*, 7(4): 296~300.
- Ma Jinyuan, Hu Shengzhong, Tian Xiangdong. 2010&. Sedimentary environment and exploitation of Mahai potash deposits in Qaidam basin. *Journal of Salt Lake Research*, 18(3): 9~17.
- Millot R, Scaillet B, Sanjuan B. 2010. Lithium isotopes in island arc geothermal systems: Guadeloupe, Martinique (French West Indies) and experimental approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 1852~1871.
- Pan Xiaochen, Cheng Huaigang, Cheng Fangqin. 2013&. Study on stepped high temperature evaporation of dissolved brine in Mahai salt lakes. *Inorganic Chemicals Industry*, 45(6): 15~18.
- Peng Xuan, Zhuang Yujun, Gu Pingyang, Shi Chao, He Shiping, Cao Baidi. 2022&. Petrogenesis of the gneissic granite in Xiaosaishiteng mountain, northern Qaidam: constraint from geochemistry, zircon U—Pb geochronology and Hf isotopes. *Northwestern Geology*, 55(4): 221~239.
- Raab M, Spiro B. 1991. Sulfur isotopic variations during seawater evaporation with fractional crystallization. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, 86(4): 323~333.
- Ren Kun, Pan Xiaodong, Lan Ganjiang, Peng Cong, Liang Jiapeng, Zeng Jie. 2021&. Seasonal variation and sources identification of dissolved sulfate in a typical karst subterranean stream basin using sulfur and oxygen isotopes. *Environmental Science*, 42(9): 4267~4274.
- Ren Qianhui, Gao Donglin, Zhang Yan, Li Binkai, Dou Yongsheng, Liu Xiuting. 2018&. The geochemistry characteristics analysis of brine in Kuntayi salt lake, Qaidam basin. *Journal of Salt Lake Research*, 26(2): 34~42.
- Scholz F, Hensen C, Delange G J, Haeckel V, Meixner A, Reitz A, Romer R L. 2010. Lithium isotope geochemistry of marine pore waters—insights from cold deep fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 74(12): 3459~3475.
- Shen Zhenqu, Tong Guobang, Zhang Junpai, Yu Shufeng, Li Yinluo. 1990&. Geological environments since Pliocene and accumulation process of saline deposit in west Chaidamu basin, Qinghai, China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 10(4): 89~99.
- Steinboefel G, Brantley S L, Fantle M S. 2021. Lithium isotopic

- fractionation during weathering and erosion of shale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 295: 155~177.
- Sun Feifei, Zhang Wanyi, Gong Juncheng, Zhang Chengjun. 2010&. The Palaeoenvironmental reconstruction on pollen proxy in the Qaidam basin since late Pliocene. *Geological Review*, 56(5): 621~628.
- Tang Yulan. 2015&. Study on Geochemical Characteristics and Genesis of Potassium-Rich Brine in Mahai Salt Lake in Qinghai Province. Supervisor: Yao Leihua. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). Master Thesis: 1~60.
- Thode H G, Monster J. 1965. Sulfur isotope geochemistry of petroleum, evaporites, and ancient seas. *AAPG Bulletin*, 4: 367~377.
- Tian Jixian, Ji Baoqiang, Zeng Xu, Wang Yetong, Li Yaoliang, Sun Guoqiang. 2022&. Development characteristics and main controlling factors of deep clastic reservoir of Xianganhaigou formation in the northern margin of Qaidam basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(5): 720~730.
- Wang Chunlian, Liu Chenglin, Xu Haiming, Wang Licheng, Shen Lijian. 2013&. Sulfur isotopic composition of sulfate and its geological significance of member 4 of Palaeocene Shashi formation in Jiangling depression of Hubei province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(3): 691~703.
- Wang Huchu, Lu Songnian, Mo Xuanxue, Li Huaikun, Xin Houtian. 2005&. An early Paleozoic collisional orogen on the northern margin of the Qaidam basin, northwestern China. *Geological Bulletin of China*, 24(7): 603~612.
- Wang Jinshou, Pan Tong, Li Peng, Tian Yongge, An Yongwei, Yu Fucheng, Lei Xiaoqing. 2022&. Metallogenic series of deposit in the northern Qaidam metallogenic belt of Qinghai province, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 44(3): 391~412.
- Wang Mili, Yang Zhichen, Liu Cheng Lin. 1997#. Potash Deposits and Development Prospects in the Northern Qaidam Basin. Beijing: Geology Press: 1~173.
- Wang Panlong, Li Yongjun, Duan Fenghao, Zhuang Yuping, Zhi Qian, Gu Pingyang, Gao Jipeng, Yang Gaoxue. 2023&. Petrogenesis and geodynamic setting of the Xiaosaishiteng mountain biotite monzonitic granite and quartz diorite in the western part of the northern margin of the Qaidam basin: constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Hf isotope. *Acta Geologica Sinica*, 97(10): 3292~3313.
- Wei Xinjun, Jiang Jixue, Wang Mili. 1992&. Sedimentary characteristics of Quaternary and evolution of saline lake of Mahai potash deposit. *Geology of Qinghai*, 1(1): 40~52.
- Wieherow R A, Lyons W B, Henderson G M. 2010. Lithium isotopic composition of the McMurdo dry valleys aquatic systems. *Chemical Geology*, 275: 139~147.
- Williams L B and Hervig R I. 2005. Lithium and boron isotopes in illite-smectite: the importance of crystal size. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(24): 5705~5716.
- Wunder B, Meixner A, Romer R L. 2006. Temperature dependent isotopic fractionation of lithium between clinopyroxene and high pressure hydrous fluids. *Contrib Mineral Petrol*, 238, 277~290.
- Xiao Yingkai, Qi Haiping, Wang Yunhui, Liu Weiguo, Jin Lin, Zhang Chonggeng. 1993&. The investigation for isotopic compositions of lithium in first exploitation area in Chaerhan. *Journal of Salt Lake Research*, 1(3): 52~56.
- Xu Jianxin, Qin Chenggong, Han Jibin, Gao Xuefeng, Guo Bin, Zhao Weiyong, Lei Tao, Han Guang. 2023&. Geochemistry of Li and its isotope: implications for origin and evolution of oil field water in Nanyishan tectonic area, Qaidam basin, northwest China. *Journal of Salt Lake Research*, 31(1): 11~24.
- Xuan Zhiqiang. 1995&. Basic characteristic of potassium and magnesium solid deposit in Kuntanyi and Mahai salt lake of Qinghai province. *Journal of Salt Lake Research*, 3(4): 1~9.
- Yan Kai, Wang Chunlian, Chen Renyi, Liu Chenglin, Wang Jiuyi, Yu Xiaocan, Li Jiansen, Li Ruiqin, Zhou Yang, Zhou Qiang. 2023. Origin and evolution of deep lithium-rich brines in the southwest Jianghan basin, central China: Evidence from hydrochemistry and stable isotopes. *Journal of Hydrology*, 626(Part A): 130163.
- Yu Xiaocan, Wang Chunlian, Huang Hua, Yan Kai. 2024. Origin of lithium in oilfield brines in continental Petroliferous basin: Insights from Li and Sr isotopes in the Jianghan basin, central China. *Marine and Petroleum Geology*, 160: 106576.
- Yuan Ye. 2015&. The Characteristics of Climate since Late Pleistocene in Lenghu Area of Qaidam Basin and Its Response to Global Climate Change and Uplift of the Plateau. Supervisor: Timothy Kusky, Xiang Shuyuan. Wuhan: Doctoral dissertation of China University of Geosciences: 1~119.
- Yue Xin, Liu Xixi, Lu Liang, Zhang Xiaodong, Fan Zenglin, Yu Xiaoliang. 2019&. Hydrochemical characteristics and origin of deep pore brine deposits in Mahai Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(3): 532~540.
- Yue Xin, Liu Xixi, Qiu Kindi, Yu Xiaoliang. 2021&. Hydrochemical characteristics and genesis of deep pore brine in Gas Hure area, western Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 29(1): 69~70.
- Yue Yue, Sun Deyou, Hou Kejun, Peng Yinbiao. 2021&. Geochronology and Geochemistry of Triassic Gabbro in Northern Wulan, Northern Margin of Qaidam Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 51(1): 154~168.
- Zeng Wenren, Meng Qingtao, Liu Zhaojun, Xu Yinbo, Sun Pingchang. 2019&. Organic geochemical characteristics and Paleo-Lake conditions of oil shale of Middle Jurassic Shimengou formation in Tuanyushan area of northern Qaidam basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(5): 1270~1284.
- Zhang Jianghua, Liang Yongping, Wang Weitai, Han Xingrui, Hou Guangcai. 2009&. A practical use of ^{34}S in the investigation of Karst groundwater resource in north China. *Carsologica Sinica*, 28(3): 235~241.
- Zhang Pengxi. 1987#. The Salt Lake of Qaidam Basin. Beijing: Science Press: 32~40.
- Zhao Jiafan, Chen Xiaohong, Jin Long. 2005&. Analysis on sedimentary environment of the third stage saline lake in Qaidam basin. *Journal of Northwestern University (Natural Science Edition)*, 35(3): 342~346.
- Zheng Mianping, Hou Xianhua, Yu Changqing, Li Hongpu, Yin Hongwei, Zhang Zhen, Deng Xiaolin, Zhang Yongsheng, Guo Tingfeng, Wei Zhao, Wang Xuben, An Lianying, Nie Zhen, Tan Xiaohong, Zhang Xuefei, Niu Xinsheng. 2015&. The leading role of salt formation theory in the break through and important progress in potash deposit prospecting. *Acta Geoscientia Sinica*, 152(2): 129~139.
- Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, Qi Wen, Kong Fanjing, Nie Zhen, Jia Qinxian, Pu Lingzhong, Hou Xianhua, Wang Hailei, Zhang Zhen, Kong Weigang, Lin Yongjie. 2016&. Progress and prospects of salt lake research in China. *Acta*

Geologica Sinica, 90(9): 2123~2166.

Zheng Ximin, Yang Liu, Yi Dinghong, Wang Pu. 2019. Distribution of gypsum and sulfur isotopes in the Palaeogene strata, western Qaidam basin, Qinghai. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39(4): 65~70.

Zhou Xun, Cao Qin, Yin Fei, Guo Juan, Wang Xiaocui, Zhang Yongshuai, Wang Lidong, Shen Ye. 2015. Characteristics of the

brines and hot springs in the Triassic carbonates in the high and steep fold zone of the eastern Sichuan basin. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1908~1920.

Zhu Pucheng. 2015. Groundwater Circulation Patterns of Yugia—Mahai Basin in the Middle and Lower Reaches of Yugia River. Supervisor: Su Xiaosi. Jilin: University of Jilin Master Thesis: 1~39.

Discussion on the genesis of Pleistocene deep pore brine of sand—gravel type in the Mahai area, northern margin of Qaidam Basin

CHEN Jingyuan^{1,2)}, WANG Qingchuan^{1,2)}, CHEN Jinniu^{1,2)}, SONG Guichun^{1,2)},
ZHANG Mingzhu^{1,2)}, LU Liang^{1,2)}

1) *Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud, Qinghai, 816099;*

2) *Qinghai Provincial Key Laboratory of Exploration Research of Salt Lake Resources in Qaidam Basin, Golmud, Qinghai, 816099*

Objectives: To discuss the hydrochemical characteristics and the genesis of gravel-type deep brine of the Mahai area in the northern margin of Qaidam Basin.

Methods: The hydrochemical and H, O, S, Li isotopic characteristics of the Pleistocene deep brine were analyzed.

Results: The results show: ① the hydrochemical type of brines are chloride-type, the K⁺ and Na⁺ of the content element are high, and the majority are higher than comprehensive evaluation index with a good resources potential; ② the ion characteristic coefficients and isotopic composition of brine indicate the brine has the characteristics of salt rock dissolution, clay mineral adsorption, strong evaporative concentration, and relatively closed conditions.

Conclusions: The brine is the product of a series of geological processes such as water—rock reactions, leaching, adsorption, and evaporation concentration by atmospheric precipitation. In the transition zone between the terminal salt lake and the alluvial fan, with the increasing pressure of overlying formation, the residual ancient water was moved to the sand—gravel layers with low pressure in front of the mountains, and eventually infiltrates to the deep sand—gravel layers, then formed the gravel-type deep pore brine deposit under the condition of relative sealing.

Keywords: northern margin of Qaidam Basin; gravel-type deep brine; hydrochemistry characteristics; stable isotope; genesis

Acknowledgements: This study was supported by the Scientific Research Project of Qinghai Geological Exploration Special Fund (No. 2023085027ky002) and State Key Research and Development Project (No. 2022YFC2904301)

First author: CHEN Jingyuan, male, master, is mainly engaged in salt resources exploration and research; Email: 18810550379@163.com

Corresponding author: WANG Qingchuan, male, senior engineer, is mainly engaged in salt resources exploration and research; Email: 41783707@qq.com

Manuscript received on: 2024-05-29; Accepted on: 2024-12-12; Published online on: 2025-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.022

Edited by: LI Ming, ZHANG Yuxu

