

柴达木盆地中部一里坪—西台吉乃尔地区深层卤水 水化学特征及成因初探

卢鋆^{1,2)}, 潘彤³⁾, 李永寿¹⁾, 李洪普⁴⁾, 韩光⁴⁾, 苗卫良¹⁾, 张西营^{1,2)}

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,
青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海西宁, 810008;

2) 中国科学院大学, 北京, 100049; 3) 青海省地质矿产勘查开发局, 青海西宁, 810001;

4) 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青藏高原盐湖及盐类矿产资源
成矿规律及预测实验室, 青海格尔木, 816005

内容提要:柴达木盆地深层卤水资源丰富, 具有很好的开发利用前景。然而, 前期研究主要侧重于柴达木盆地西部和北部地区, 对盆地中部深层卤水赋存情况所知甚少, 其形成机制尚不明确。本研究以柴达木盆地中部一里坪和西台吉乃尔盐湖周边的深层卤水为研究对象, 利用该地区深钻获取的深层卤水样, 开展水化学及 B 同位素组成研究, 阐明柴中地区深层卤水水文地球化学特征并初步探讨其成因。分析结果显示, 盆地中部深层卤水矿化度较高, 为 CaCl_2 型水体。综合各种离子特征系数对研究区深层卤水进行系统分析, 发现盆地中部深层卤水的形成与岩盐溶滤作用以及封闭地层条件下强烈的变质作用有关。同时初步推测 B 同位素来自于深层地热水。常、微量元素的不同来源反映了深层卤水物质来源的“二元结构”特征。本研究结果将为深入认识整个柴达木盆地深层卤水成因机理提供重要的科学依据。

关键词: 深层卤水; 水化学; 硼同位素; 一里坪—西台吉乃尔盐湖; 柴达木盆地

柴达木盆地盐类资源丰富, 是我国重要的钾肥工业基地。近年来随着资源的深度开发, 盆地面临着资源逐步枯竭的困境。20 世纪 90 年代以来, 随着大量勘探、研究工作的不断推进, 柴达木盆地西部发现了丰富的深层卤水资源, 主要赋存于古近纪—新近纪地层中且其分布与背斜构造密切相关(Wang Linlin et al., 2020)。前人从不同的角度对其形成和演化过程进行了系统研究, 发现其基本形成于还原环境且来源具有深部岩浆热液和地层水的混合源特征(Fan Qishun et al., 2007; Tan Hongbing et al., 2011; Li Jiansen et al., 2013; Shi Guocheng et al., 2016)。

新生代以来, 柴达木盆地发育了多期蒸发岩沉积, 然而该区域除了第四纪盐湖资源得到充分

开发利用以外, 深部卤水及早期盐类资源的勘探研究工作仍显薄弱。特别是柴达木盆地中部的深部卤水, 因勘探工作很少导致该区深层卤水的相关信息极为匮乏, 这严重制约了对整个柴达木盆地盐类矿床成因阐释及成矿规律的认识。近期, 青海省柴达木综合地质矿产勘查院在一里坪—西台吉乃尔盐湖附近地区实施了三个 2500~3000 m 的深部勘探钻孔。本论文依托三个钻孔及临近的两个早期的油田勘探钻孔, 采集了深部卤水样品并开展了元素与同位素地球化学分析。本论文通过这些研究, 旨在阐明柴达木盆地中部地区深层卤水水化学特征并初步探讨卤水成因, 从而为系统和全面研究整个柴达木盆地深层卤水演化提供重要的科学依据。

注: 本文为第二次青藏高原综合科学考察研究(编号 2019QZKK0805), 国家自然科学基金项目(编号 41807216、41672087), 青海省基础研究计划项目(编号 2019-ZJ-7004), 西部之光人才计划项目“柴达木盆地中部地区深层富钾锂卤水成因机制与资源潜力评价”资助的成果。

收稿日期: 2021-03-03; 改回日期: 2021-05-24; 网络发表日期: 2021-06-12; 责任编辑: 周健。

作者简介: 卢鋆, 男, 1988 年生。硕士研究生, 地球化学专业。E-mail: lujunzky@126.com。通讯作者: 张西营, 男, 1977 年生。博士, 研究员。E-mail: xyzhchina@isl.ac.cn。

引用本文: 卢鋆, 潘彤, 李永寿, 李洪普, 韩光, 苗卫良, 张西营. 2021. 柴达木盆地中部一里坪—西台吉乃尔地区深层卤水水化学特征及成因初探. 地质学报, 95(7): 2129~2137, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021161.
Lu Jun, Pan Tong, Li Yongshou, Li Hongpu, Han Guang, Miao Weiliang, Zhang Xiyong. 2021. A preliminary investigation of hydrochemical characteristics and genesis of deep brine in the central Qaidam basin. Acta Geologica Sinica, 95(7): 2129~2137.

1 区域地质背景

1.1 构造演化

柴达木盆地地处青藏高原东北隅,呈不规则菱形。盆地东西长 850 km,南北宽 150~300 km,盆内面积约 $12.1\times 10^4\text{ km}^2$ 。该盆地在大地构造上属于特提斯构造域的中亚区,其北侧为祁连造山带,南侧为东昆仑构造带,西侧为阿尔金构造带,这些周缘构造带都经历了各自长期、复杂的地质演化过程(Dai Junsheng et al., 2000; Tang Liangjie et al., 2000; Wang Buqing et al., 2006)(图 1)。

前人研究表明,柴达木盆地在寒武纪—泥盆纪时期是一个相对独立的块体(Tang Liangjie et al., 2000)。印支运动以后,柴达木陆块与周缘陆块完成拼合,逐渐过渡到陆内盆地构造演化阶段(Tang Liangjie et al., 2000)。中、新生代以来,盆地开始广泛接受沉积,形成了一套厚约 6000~7000 m、部分地区逾 10000 m 的盖层(Zhao Fan et al., 2013)。随着印度板块和欧亚板块碰撞后“远程效应”的控制,盆地边缘断裂构造重新活化。此时盆地属典型的西部盆-山构造型式,盆地基底周边由断裂带所控制(Wang Yadong et al., 2011)。盆地的断裂系统分为盆地北缘断裂带、东昆仑山北缘断裂带、阿尔金山断裂带和盆地内断裂系 4 个部分。这些边界断裂规模大,形成的时间早,活动的时间长,控制着盆地中、新生代的沉积。同时受阿尔金断裂活动的影响,

柴达木盆地西部发育了一系列 NW-SE 向褶皱构造(Zhang Tao et al., 2012)。其中的背斜构造中发现了丰富的深层卤水资源。

研究区位于柴达木盆地中部地区,一里坪与西台吉乃尔盐湖分别位于研究区中部与东部,湖盆属构造断陷成因(Zhang Xiying et al., 2012)。区内有多处背斜构造发育,西南为碱石山、落雁山,东北为鄂博梁,中部为红三旱。平均海拔高度约 2680 m,发源于昆仑山北坡的那棱格勒河注入台吉乃尔湖(Gao Donglin et al., 2006)(图 1)。西台吉乃尔盐湖在柴达木盆地构造分区上属于茫崖坳陷中的一里坪凹陷区,位于柴达木盆地东部沉降区的西端,是由褶皱和断裂构造运动形成的一个次级成盐盆地,处于巴嘎雅乌尔背斜和船形丘背斜之间的一个 V 级小型向斜中(Dai Junsheng et al., 2003; Gao Donglin et al., 2006)。

1.2 地层与沉积特征

盆地新生代以来的沉积由老到新依次划分为:古、始新统路乐河组($E_{1+2}l$),渐新统下干柴沟组(E_3g),中新统上干柴沟组(N_1g)和下油砂山组(N_{1y}),上新统上油砂山组(N_2y)和狮子沟组(N_2s),七个泉组(Qp^{1+2})(表 1)。本次研究选择的 5 个钻孔位于背斜构造,深度介于 2000~4000 m 不等。

近年来随着盆地年代学研究成果的不断积累,尤其是高精度古地磁定年方法的利用,比较准确地限定了各地层的时代,建立了盆地年代学框架(Liu

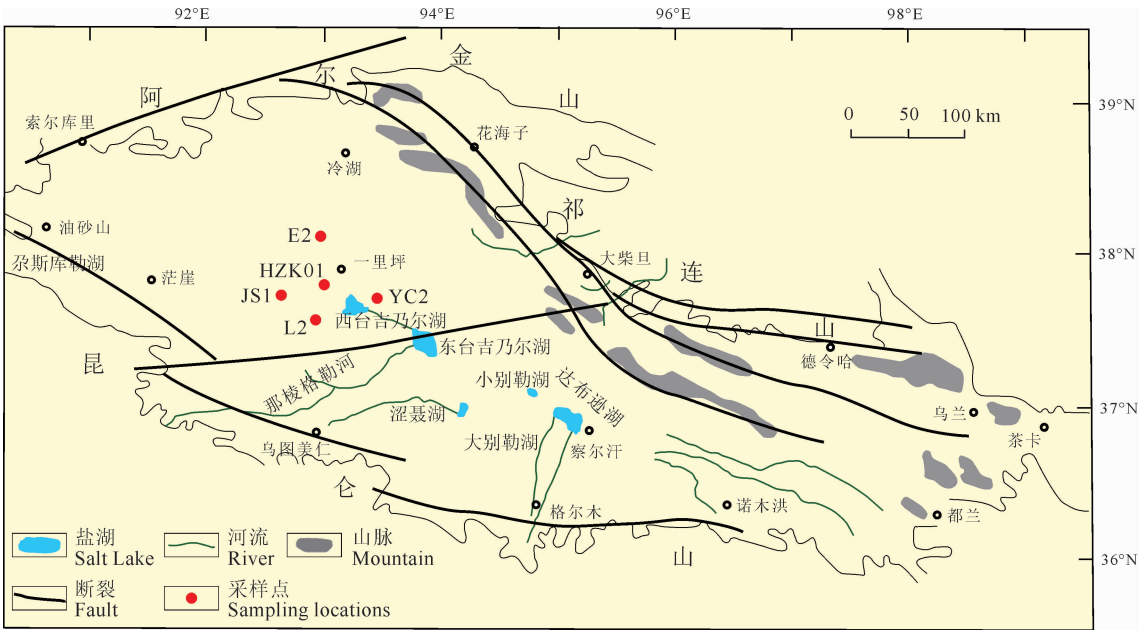


图 1 柴达木盆地地质简图与采样点位置(据 Gao Chunliang et al., 2009)

Fig. 1 Geological sketch map and sampling location of Qaidam basin (modified from Gao Chunliang et al., 2009)

Zechun et al. , 1996;Sun Zhiming et al. , 2004;Fan Qishun et al. , 2007) 。研究区古近系环境经历了水体由浅变深的过程,从路乐河组到下干柴沟组发育的地层以滨浅湖亚相、半深湖亚相为主,西部边缘的鄂博梁地区依次经历冲积扇—泛洪平原—辫状河—滨浅湖相沉积(Su Nina et al. , 2014) 。新近纪地层主要发育湖相沉积,岩性以混积岩、灰色泥岩、粉砂质泥岩为主(Zeng Xu et al. , 2021) 。第四系以浅湖-滨湖相为主,晚期中部出现半深湖相(Dang Yuqi et al. , 2004) 。

表 1 柴达木盆地新生代磁性地层年代表
(据 Nie Junsheng et al. , 2019)

Table 1 Cenozoic magnetic stratigraphy of the Qaidam basin
(modified from Nie Junsheng et al. , 2019)

国际标 准年代(Ma)	地层		
	世	组	磁性地层年代 (Ma)
2.6	全新世		2.65~0
	更新世	七个泉组	
24	上新世	狮子沟	8.2~2.65
	中新世	上油砂山组	14.9~8.2
		下油砂山组	22~14.9
65	渐新世	上干柴沟组	31.5~22
	始新世	下干柴沟组	42.8~31.5
	古新世	路乐河组	

从沉积相研究成果来看,新生代以来柴达木盆地的沉积中心具有自西向东迁移的特征(Liu Zuhan et al. , 2006; Chen Xuanhua et al. , 2011),早期(古新世和早始新世)盆地沉积中心位于盆地西部,随后逐步向东迁移,至中新世和上新世盆地沉积中心已

经迁移到了盆地东部。

2 样品采集与分析

本研究 5 件深部卤水样品均采自柴达木盆地中部背斜构造区实施的深部钻孔(图 1),包括碱石山(JS1)、落雁山(L2)、鸭湖(YC2)、红三旱(HZK01)、鄂博梁(E2)等。钻孔水量大,水头压力大、水温高,如 YC2 卤水温度为 68℃,HZK01 卤水温度达 85℃,推算水头 151 m。钻孔剖面见图 2。各钻孔含水层集中分布层位深浅不一,钻孔 JS1、L2、YC2、HZK01、E2 深层卤水埋深分别为 670~2495 m、1800~2500 m、300~2515 m、1080~2922 m、1770~1950 m。卤水采集前,将提前备好的 10 L 聚乙烯取样桶用钻孔中的卤水清洗 3 次,从钻井中抽取深层卤水现场测试其温度、pH 值。为防止采集的样品蒸发,直接装入取样桶并用保鲜膜封装,然后在低温条件下尽快送回实验室测试,运输过程进行遮盖以避免阳光照射。

样品水化学成分测试包括 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、Cl⁻ 等常量离子与 B³⁺、Li⁺、Rb⁺、Cs⁺、Sr²⁺、F⁻、Br⁻、I⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻ 等微量离子。测试方法:用重量法测定水样中的 K⁺、SO₄²⁻,测试精度为 1%;用滴定法测定水样中的 Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻ 浓度,测试精度为 0.2%;Na⁺ 浓度采用差减法计算,精度为 2%;微量离子采用 ICP-OES 法测定,各元素标准溶液均为 1000 μg/mL 单标准贮备液配制成适当浓度的标准溶液并贮

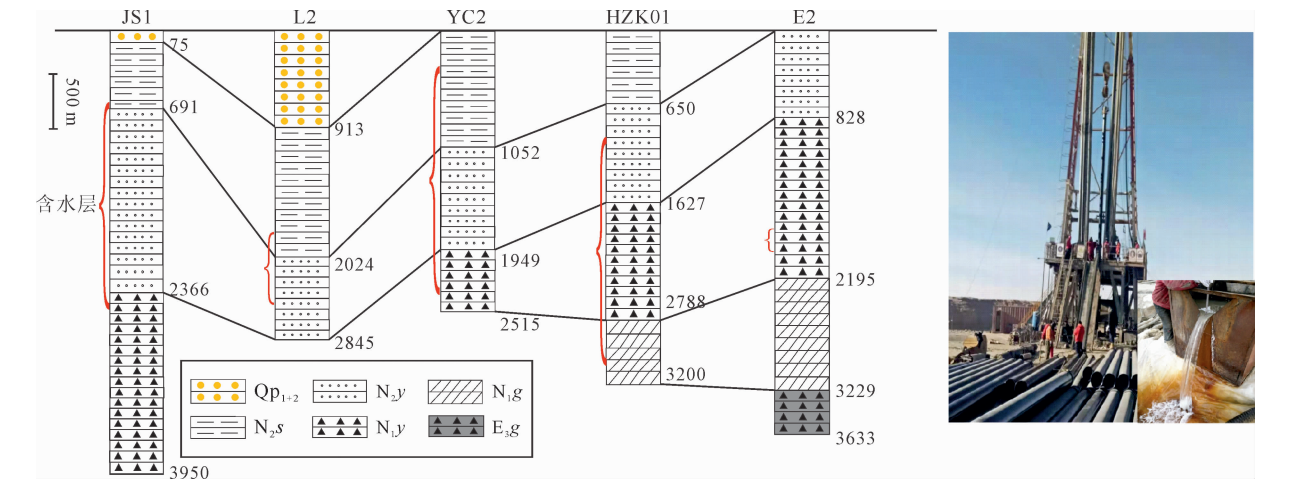


图 2 柴达木盆地中部一里坪和西台吉乃尔盐湖区钻孔剖面及卤水样品采样

Fig. 2 Borehole profiles and brine samples from Yiliping and Xitaijinar salt lakes in central Qaidam basin

Qp¹⁺²—七个泉组;N₂s—狮子沟组;N₂y—上油砂山组;N₁y—下油砂山组;N₁g—上干柴沟组;E₃g—下干柴沟组

Qp¹⁺²—Qigequan Formation; N₂s—Shizigou Formation; N₂y—Shangyoushashan Formation;
N₁y—Xiayoushashan Formation; N₁g—Shangganchaigou Formation; E₃g—Xiaganchaigou Formation

存于聚丙烯瓶中保存。

硼同位素测试采用甘露醇法完成,所有样品经过纯化分离、再生 Amberlite 硼特效树脂、离子交换、蒸发浓缩、再生阴阳离子混合树脂、二次交换、蒸发浓缩等步骤进行预处理,然后上机测试。硼同位素标准物质 NBS951H3B03 的值为 $4.05193 \pm 0.00012(n=3)$ 。水化学组分与硼同位素测试均在中国科学院青海盐湖研究所盐湖化学分析测试中心完成。

3 结果

3.1 水化学特征

通过测试获得了深层卤水水化学成分(表 2)。深层卤水中 $n(\text{Na}^+) < n(\text{Cl}^-)$ 且 $[n(\text{Cl}^-) - n(\text{Na}^+)]/n(\text{Mg}^{2+}) > 1$,依据苏林成因分类判断其水化学类型为氯化钙型。

从水化学分析结果看,一里坪—西台吉乃尔盐湖区深层卤水矿化度较高,其平均值为 145.36 g/L ,最低值为 70.72 g/L 。相对柴达木盆地西部和北部深层卤水,中部地区的矿化度大致介于二者之间(Li Wenxia et al., 2016;Liu Xixi et al., 2019)。常量离子中 Na^+ 、 Cl^- 占绝对优势,与柴西狮子沟背斜构造区深部卤水对比发现, Na^+ 、 Cl^- 含量总体偏低(Liu Xixi et al., 2019)。从阳离子组成来看, $\rho(\text{Na}^+) > \rho(\text{K}^+) > \rho(\text{Ca}^{2+})$, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 的质量浓度介于 $24.30 \sim 84.94 \text{ g/L}$ 之间,与青藏高原大部分地表盐湖不同,深层卤水 Mg^{2+} 质量浓度较小(Li Ruiqin et al., 2018)。主要阴离子组成为 $\rho(\text{Cl}^-) > \rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{CO}_3^{2-})$, Cl^- 质量浓度介于 $74.15 \sim 143.52 \text{ g/L}$ 之间, SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 质量浓度与 Cl^- 相差一个数量级以上。

深层卤水中 B、Li、Sr 等元素含量均较高,其含量远高于海水(Li Jianseng et al., 2014)。样品中 Li 的含量变化远大于 B。Sr 是典型的分散元素,在自然界中主要以类质同象的形式分布在造岩矿物中,也可以以天青石、菱锆矿的形式产出。研究区深

层卤水样品中 Sr^{2+} 异常富集,其含量介于 $129.50 \sim 547.50 \text{ mg/L}$ 之间,平均含量为 332.82 mg/L 。根据《盐湖和盐类矿产地质勘查规范》(DZ/T0212—2002),液体钾矿的边界品位为 $0.3\% \sim 0.5\%$,卤水锂矿(LiCl)的边界品位为 150 mg/L ,卤水硼矿(B_2O_3)可资利用的边界品位为 400 mg/L ,深层卤水中 B 含量达到边界品位,部分钻孔 Li 含量达到边界品位,而 K 的含量绝大部分低于边界品位的要求。综合来看,这些深层卤水具有较好的综合利用价值。

表 2 柴达木盆地中部一里坪和西台吉乃尔盐湖区
深层卤水水化学分析表

样品编号	JS1	L2	E2	HZK01	YC2
密度(g/mL)	1.09	1.1	1.04	1.16	1.08
pH	7.51	6.87	7.48	7.02	7.16
TDS(g/L)	140.7	151.85	70.72	238.7	124.8
K^+ (g/L)	1.96	1.22	0.48	0.65	0.61
Na^+ (g/L)	48.01	47.5	23.83	84.29	39.59
Ca^{2+} (g/L)	3.94	7.3	2.57	5.92	6.22
Mg^{2+} (g/L)	0.41	0.86	0.37	1.23	0.89
SO_4^{2-} (g/L)	0.83	0.57	1.32	0.52	0.81
Cl^- (g/L)	82.23	88.82	40.87	143.51	74.15
HCO_3^- (g/L)	0.21	0.16	0.28	0.19	0.09
Li^+ (mg/L)	104.6	57.9	20	9	22
B^{3+} (mg/L)	496.5	269.1	239	174	134.5
Br^- (mg/L)	59.25	59.75	35.17	30.68	54.25
Sr^{2+} (mg/L)	264.2	420.9	129.5	547.5	302

深层卤水离子特征系数计算结果表明(表 3),钠氯系数介于 $0.53 \sim 0.59$ 之间,变化小,溴氯系数介于 $0.21 \sim 0.86$ 之间,脱硫系数一般介于 $0.18 \sim 0.54$ 之间,钙镁系数最小值为 $4.82(\text{HZK01})$ 。

3.2 硼同位素组成

B 有两种稳定同位素: ^{10}B 和 ^{11}B ,其丰度分别是 19.82% 和 80.18% (Xiao et al., 2013)。B 作为一种不相容的亲石元素,在水溶液中主要以 $\text{B}(\text{OH})_3$ 和 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 的形式存在,两者的相对含量受控于体系中 pH、压力、温度等因素影响(Kakihana et al., 1977)。 ^{11}B 倾向于进入三配位,而 ^{10}B 倾向于进入四

表 3 柴达木盆地中部一里坪和西台吉乃尔盐湖区深层卤水离子特征系数

样品编号	钠氯系数 ($r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$)	溴氯系数 ($\times 10^3 r_{\text{Br}}/r_{\text{Cl}}$)	脱硫系数 ($\text{SO}_4^{2-} \times 10^2 / 2 \times \text{Cl}$)	钾氯系数 ($\rho_{\text{K}} \times 1000 / \rho_{\text{Cl}}$)	钙镁系数 ($n\text{Ca}^{2+} / n\text{Mg}^{2+}$)
JS1	0.58	0.72	0.51	23.89	8.5
L2	0.55	0.67	0.32	13.69	8.44
E2	0.58	0.86	1.61	11.62	7.05
HZK01	0.59	0.21	0.18	4.5	4.82
YC2	0.53	0.73	0.54	8.19	6.99

配位(Palmer et al. , 1996)。实验研究表明,B 同位素分馏会随着压力的增大而减小,且压力的影响会随着温度的升高而减弱(Sanchez-Valle et al. , 2005)。对一里坪—西台吉乃尔盐湖区深层卤水 B 同位素及相关系数进行了测试与计算(表 4)。本区深层卤水 B 同位素组成变化范围在 +17.10‰~+26.69‰ 之间,平均为 20.47‰,远小于海水 39.5‰,但高于柴达木盆地盐湖卤水 $\delta^{11}\text{B}$ 的平均值 9.6‰,其变化幅度也小于青藏高原南部南沁盆地盐泉硼同位素值(Xiao Yingkai et al. , 1999; Han Jilong et al. , 2018)。B 含量与柴达木盆地西部油田卤水相比大体相当(Li Jianseng et al. , 2013)。

表 4 柴达木盆地中部一里坪和西台吉乃尔盐湖区深层卤水硼同位素组成特征

Table 4 Boron isotope composition of deep brine in Yiliping and Xitaijinar salt lakes in the central Qaidam basin						
样品 编号	TDS (g/L)	B ³⁺ (mg/L)	B/Cl	B/Li	$\delta^{11}\text{B}$ (‰)	$\delta^{11}\text{B}$ 误差(±)
JS1	140.7	496.50	0.006	4.75	17.77	0.08
L2	151.85	269.10	0.003	4.65	20.37	0.08
E2	70.72	239.00	0.005	11.95	20.44	0.24
HZK01	238.7	174.00	0.001	19.33	17.10	0.05
YC2	124.8	134.50	0.002	6.11	26.69	0.15

4 讨论

4.1 物质来源与沉积环境

深部卤水根据来源可以分为 3 种类型:① 同生沉积卤水;② 大气渗入起源卤水;③ 混合起源的卤水(Zhang Pengxi, 1987)。

钠氯系数($r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}}$)是反映地层封闭性好坏、油田水变质程度、地层水活动性的重要参数,溶盐地下卤水此系数大于或接近 1,残余地下卤水(蒸发岩地下卤水)一般小于 0.85~0.87(Li Tingwei et al. , 2006);溴氯系数越高说明卤水浓缩程度越高(Han Jiajun et al. , 2013);脱硫系数($\text{SO}_4^{2-} \times 10^2 / 2 \times \text{Cl}$)常用来表示卤水所处环境的封闭程度,当该值越接近 0,表示卤水的封闭性越好,还原性越好(Han Jiajun et al. , 2013);钾氯系数($\rho_{\text{K}^+} \times 1000 / \rho_{\text{Cl}^-}$)可以反映钾的富集和地下卤水的浓缩程度,此系数大于 75 表示卤水富钾,卤水经历的演化时间长(Han Jiajun et al. , 2013);钙镁系数($n\text{Ca}^{2+} / n\text{Mg}^{2+}$)反映地下卤水变质程度,封闭时间越长,反映卤水封闭性越好且变质程度越高,此数值就越高,判断标准值为 3,深层卤水该项指标一般大于 3。研究区各钻孔深层卤水钠氯系数变化小,介于 0.53~0.59 之间,

低钠氯系数与水变质程度高有关(Li Xianqing et al. , 2002)。据汪蕴璞等研究:卤水 $r_{\text{Na}}/r_{\text{Cl}} < 0.87$,溴氯系数($\times 10^3 r_{\text{Br}}/r_{\text{Cl}}$) > 3.33 时,为沉积变质卤水;岩盐溶解形成的卤水溴氯系数为 0.083~0.83(Wang Yunpu et al. , 1982; Li Tingwei et al. , 2006; Alcal'a et al. , 2008)。

通过对比分析 5 个钻孔卤水的钾氯系数,发现 JS1 孔钾氯系数最大仅为 23.89,反映出深层卤水并不富钾。根据溴氯系数推测深层卤水具有岩盐溶滤成因。依据钠氯系数进一步推断研究区卤水在深部经历了阳离子交替吸附和强烈的水岩相互作用(Li Jiansen et al. , 2013)。样品钙镁系数远大于 3,同样反映其属沉积变质成因,脱硫系数很小也印证了这一点。综合以上钠氯系数、溴氯系数、钙镁系数、脱硫系数的特征,推测深层卤水在地下封闭空间经历了强烈的变质作用。

4.2 研究区深部卤水成因初探

深层卤水的成因一般涉及水体来源、卤水中各元素来源及其该体系在后期所发生的改造或变化作用等过程。深层卤水在迁移的途中与盆地内部地层中已有蒸发岩发生了广泛的水-岩作用,从而富含 Na、Cl 元素,同时不排除还溶滤了少量 K 和一些其他微量元素,本区深层卤水溴氯系数和钠、氯离子的含量与矿化度之间的关系都支持这一结论。同时与盆地西部深层卤水已有的研究结论基本一致(Liu Xixi et al. , 2019),表明该区深层卤水和盆地西部深层卤水具有成因上的关联性,是否是盆地沉积中心转移过程中的卤水迁移所致,需要进一步研究。

从卤水的水化学特征来看,深层卤水是富含多种资源元素的复杂水盐体系,决定了其形成必然具有复杂性。Li Tingwei et al. (2013)认为,油田卤水的 B 同位素组成与卤水的浓缩程度不具有相关性,而主要与其补给源的 B 同位素组成有关,故油田卤水的 B 同位素组成可反映其物质来源(Li Tingwei et al. , 2013)。本研究样品中 B 同位素平均值为 20.44‰,且各采样点数值近似,说明他们具有相同的来源;同时,研究区 B 同位素值与盆地西部油田水 B 同位素平均值十分接近(Li Tingwei et al. , 2013)。B 同位素值与 pH 之间并无显著性相关关系($R^2=0.08$),表明样品的 pH 不是影响该区域 B 同位素变化的主要因素。相对于柴达木盆地盐湖不到 10‰的平均含量,深层卤水硼同位素组成明显偏正。导致偏正的原因可能包括:① B/Cl 异常偏小反映黏土矿物的吸附作用使得 $\delta^{11}\text{B}$ 升高

(Xiao Yingkai et al., 1999); ② 碳酸盐结晶过程中, ^{10}B 会优先于 ^{11}B 进入 CaCO_3 的晶格中或与碳酸盐共沉淀, 深层卤水 Ca^{2+} 含量较高, 卤水中的 ^{10}B 可能会随少量的碳酸盐析出进入到固相中, 从而导致 $\delta^{11}\text{B}$ 值相对增加 (Vengosh et al., 1989)。但本次研究样品数较少, 深层卤水 $\delta^{11}\text{B}$ 与 Ca^{2+} 含量的相关性不能充分说明这一点。

前人研究认为, 那棱格勒河的输入可能是东台吉乃尔盐湖富含 B、Li 资源的主要原因 (Wei Haizhen et al., 2014), 其上游布喀大阪山麓富含 B、Li 的热水资源, 热水 Li、B 的浓度分别高达 96 mg/L、180 mg/L, 含 Li 河水源源不断地输入柴达木盆地低洼地带的盐湖, 在极端干旱的气候条件下蒸发富集, 形成卤水锂矿床 (Yu Junqing et al., 2013; Li Qingkuan et al., 2019; Gao Chunliang et al., 2019)。一里坪—西台吉乃尔盐湖都接受那棱格勒河水补给, 地表水向下运移过程中伴随 B 等微量元素的输送。盐湖锂矿的锂主要来自于那棱格勒河水的补给, 而古湖迁移演化残留、西部含盐系地层淋滤水或油田水对研究区盐湖溶质贡献可基本忽略不计 (Li Qingkuan et al., 2019)。同时, 对研究区深层卤水 B、Li 含量进行相关性分析, 发现两者有很高的相关性 ($R^2=0.88$), 也从另一方面表明其具有相同的物质来源和相似的地球化学行为。晚中新世特别是上新世以来, 柴达木盆地西部发生强烈构造变形, 断裂系统广泛发育 (Wang Yadong et al., 2012)。盆地周缘山区的断裂带附近分布着许多中生代至近代的火山, 而火山活动形成的地热水中含有丰富的 B、Li (Li Jianseng et al., 2014)。深部岩浆热液带来大量的 B、Li 元素沿着断裂带上升并随地下水循环系统运移, 最终保存在含盐地层中 (Garrett et al., 2004)。

综上所述, 我们得出柴达木盆地中部地区深层卤水溶质主要来自地层中的岩盐溶解, 同时不排除还溶滤了少量 K 元素和其他微量元素。在这个过程中地热水和地质时期地表水体的参与混杂可能是形成 B、Li 等元素异常的主要原因, 脱硫系数及其他特征系数分析发现卤水体系在后期的深部封闭环境中经历了强烈的变质作用, 从而形成了 CaCl_2 型水体。因此可以认为, 研究区深层卤水溶质来源显示了其形成过程中的“二元结构”, 亦即卤水中是由含 Na、Cl 等常量元素与 B、Li 等微量元素的具有不同物源的混合水体构成。这可能就是造成盆地不同区域水化学特征存在差异性的重要原因之一。

5 结论

(1) 柴达木盆地中部深部卤水为 CaCl_2 型, 其中 B、Li 含量较高。

(2) 水化学综合分析表明, 卤水体系中的 Na、Cl 等主量元素主要来源于卤水运移过程中溶滤的地层中的岩盐, 深层卤水中的 B 元素主要与卤水形成过程中地热水携入有关, 卤水体系在后期的深部封闭环境中经历了强烈的变质作用。柴达木盆地中部地区深部卤水物源具有“二元结构”特征。

(3) 综合分析表明, 柴达木盆地中部深层卤水与西部的 CaCl_2 型深层卤水在成因上具有相似性, 即具有地热水和地层水的混合来源。

致谢: 感谢中国科学院青海盐湖所盐湖化学分析测试中心刘玉秀博士在样品硼同位素测试中的指导; 感谢青海盐湖所薛园、李园等老师在测试工作中给予的大力支持; 感谢审稿专家中肯的修改意见, 使论文得以完善!

References

- Alcal'a F J, Custodio E. 2008. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology*, 359(1): 189~207.
- Chen Xuanhua, Yin An, George Gehrels, Li Li, Jiang Rongbao. 2011. Chemical geodynamics of granitic magmatic activity in the basement of the eastern Qaidam basin. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 157~171 (in Chinese with English abstract).
- Dai Junsheng, Cao Daiyong. 2000. Evolution of Cenozoic tectonic styles in the Qaidam basin. *Geological Review*, 46(5): 455~460 (in Chinese with English abstract).
- Dai Junsheng, Ye Xingshu, Tang Liangjie, Jin Zhijun, Shao Wenbin, Hu Yong, Zhang Bingshan. 2003. Tectonic zoning and hydrocarbon prospects of Qaidam basin. *Chinese Journal of Geology*, 38(3): 291~296 (in Chinese with English abstract).
- Dang Yuqi, Zhang Daowei, Xu Ziyuan, Hou Zesheng. 2004. Quaternary sedimentary facies and biogas accumulation in Sanhu area, Qaidam basin. *Journal of Palaeogeography*, 6(1): 110~118 (in Chinese with English abstract).
- Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbing, Xu Jianxin, Li Tingwei. 2007. Characteristics and genesis of brine in the western Qaidam basin. *Geochimica Sinica*, 36(6): 601~611 (in Chinese with English abstract).
- Gao Chunliang, Yu Junqing, Zhan Dapeng, Zhang Lisha, Cheng Aiyong. 2009. Formation and distribution of boron resources in salt lake of Qaidam basin, China. *Salt Lake Research*, 17(4): 6~13 (in Chinese with English abstract).
- Gao Chunliang, Yu Junqing, Min Xiuyun, Cheng Aiyong, Hong Rongchang, Zhang Lisha, Li Tingwei. 2019. The sedimentary evolution of Da Qaidam salt lake in Qaidam basin, northern Tibetan Plateau: implications for hydro-climate change and the formation of pinnoite deposit. *Environmental Geology*, 78(463): 1~15.
- Gao Donglin, Ma Haizhou, Zhang Xiyong, Han Fengqing, Zhou Dujun. 2006. Occurrence characteristics of underground brine in Xitaijiner salt lake. *Salt Lake Research*, 14(2): 1~6 (in Chinese with English abstract).
- Garrett D E. 2004. Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride. Mining Engineering (August).

- Han Jiajun, Zhou Xun, Jiang Changlong, Hu Liangjun, Fang Bin, Sun Qi. 2013. Hydrochemical characteristics and origin and evolution of underground brine in the western Qaidam basin. *Geoscience*, 27(6): 1454~1464 (in Chinese with English abstract).
- Han Jilong, Han Fengqing, Syed-Asim Hussain, Liu Wenyu, Nian Xiuqing, Mao Qingfei. 2018. Origin of boron and brine evolution in saline springs in the Nangqen basin, southern Tibetan Plateau. *Geofluids*, 2018:1~12.
- Kakihana H, Kotaka M, Satoh S, Nomura M, Okamoto M. 1977. Fundamental studies on the ion-exchange separation of boron isotopes. *Bull. Chem. Soc. Japan*, 50(1): 158~163.
- Li Jiansen, Li Tingwei, Ma Haizhou, Peng Ximing. 2013. Hydrochemical characteristics and geological significance of brine from Neogene and Paleogene oilfields in the western Qaidam basin. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 40(6): 28~36 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiansen, Li Tingwei, Peng Ximing, Han Yuanhong, Li Zhongping, Ma Haizhou. 2014. Hydrogeochemical characteristics of Tertiary oilfield water in western Qaidam basin. *Oil & Gas Geology*, 35(1): 50~55 (in Chinese with English abstract).
- Li Qingkuan, Fan Qishun, Wang Jianping, Qin Zhanjie, Zhang Xiangru, Wei Haicheng, Du Yongsheng, Shan Fashou. 2019. Hydrochemistry, distribution and formation of lithium-rich brines in salt lakes on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Minerals*, 9(528):1~15.
- Li Ruiqin, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Jiuyi. 2018. The tempo-spatial characteristics and forming mechanism of lithium-rich brines in China. *China Geology*, (1):72~83.
- Li Tingwei, Tan Hongbing, Fan Qishun. 2006. Hydrochemical characteristics and genetic analysis of underground brine in western Qaidam basin. *Salt Lake Research*, 14(4):26~32 (in Chinese with English abstract).
- Li Tingwei, Li Jiansen, Ma Haizhou, Li Binkai. 2013. Study on boron isotope geochemistry of brine from western Qaidam basin. *Journal of Salt Lake Research*, 21(2): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenxia, Zhang Xiying, Miao Weiliang, Li Yongshou, Tang Qiliang, Wang Bo, Li Yuan, Zhu Guangqin. 2016. Hydrochemical characteristics of Lianghu 3 structure oilfield in the northern margin of Qaidam basin. *Salt Lake Research*, 24(2): 12~18 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianqing, Hou Dujie, Tang Youjun, Hu Guoyi, Zhang Aiyun. 2002. A preliminary study on the relationship between chemical composition of formation fluid and natural gas reservoir: a case study of atmospheric field in central Ordos basin. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 9(5): 1~4 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xixi, Yue Xin, Yuan Wenhua, Fan Zenglin, Yu Xiaoliang, Dong Qiwei, Chen Jinniu. 2019. Hydrochemical characteristics and evolution of deep brine in Shizigou anticline, western Qaidam basin. *Salt Lake Research*, 27(1):73~71 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zechun, Wang Jian, Wang Yongjin, Sun Shiyong, Chen Yan'an, Zhang Jianxin, Jiang Wenying, Fan Lianshun, Li Jianqing, Yang Fan, Qu Pingyan, Chen Huailu. 1996. Chronostratigraphy and climatic stratigraphy of the Lower Tertiary in the Mangya sag, Qaidam basin. *Journal of Stratigraphy*, (2): 104~113.
- Liu Zuhan, Wu Genyao, Yang Mengda, Guo Ze, Wen Zhifeng. 2006. Cenozoic sedimentary characteristics of the western Qaidam basin and its response to the strike slip activity of the Altun fault. *Chinese Journal of Geology*, 41(2): 344~354 (in Chinese with English abstract).
- Nie Junsheng, Ren Xueping, Joel E Saylor, Su Qingda, Brian K Horton, Meredith A Bush, Chen Wenhan, Katharina Pfaff. 2019. Magnetic polarity stratigraphy, provenance, and paleoclimate analysis of Cenozoic strata in the Qaidam basin, NE Tibetan Plateau. *GSA Bulletin*, 132(1):310~320.
- Palmer M R, Swihart G H. 1996. Boron isotope geochemistry: an overview. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 33(1): 709~744.
- Sanchez-Valle C, Reynard B, Daniel I, Lecuyer C, Martinez I, Chervin J-C. 2005. Boron isotopic fractionation between minerals and fluids; new insights from in situ high pressure-high temperature vibrational spectroscopic data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(17): 4301~4313.
- Shi Guocheng, Zhang Xiying, Li Yongshou, Tang Qiliang, Miao Weiliang, Li Wenxia, Xue Yuan, Li Yuan. 2016. Water-water chemical composition and distribution characteristics of Lianghu No. 4 structural oilfield in the northern margin of Qaidam basin. *Salt Lake Research*, 24(2): 19~25 (in Chinese with English abstract).
- Su Nina, Jin Zhenkui, Song Fan, Gu Junfeng, Chen Ying, Zhang Weidan. 2014. Sedimentary facies of Paleogene in Qaidam basin. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 38(3): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhiming, Yang Zhenyu, Ge Xiaohong, Pei Junling, Guo Xinchuan, Li Weimin, Ma Zhiqiang, Xu Shujin. 2004. Advances in magnetic dating of the Paleogene in the northwestern margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 23(10): 899~902 (in Chinese with English abstract).
- Tang Liangjie, Jin Zhijun, Zhang Mingli, Liu Chiyang, Wu Hanning, You Fubao, Zhang Bingshan. 2000. Tectono-paleogeographic analysis of Qaidam basin. *Earth Science Frontier*, 7(4): 421~429 (in Chinese with English abstract).
- Tan Hongbing, Rao Wenbo, Ma Haizhou, Chen Jiansheng, 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.
- Vengosh A, Chivas A R, Mcculloch M T. 1989. Direct determination of boron and chlorine isotopic compositions in geological materials by negative thermal-ionization mass spectrometry. *Chemical Geology Isotope Geoscience*, 79(4): 333~343.
- Wang Buqing. 2006. Cenozoic tectonic evolution and sedimentary characteristics of Qaidam basin. *Petroleum Geology of Xinjiang*, 27(6): 670~672 (in Chinese with English abstract).
- Wang Linlin, Yu Dongdong, Fu Yun, Yan Min. 2020. Tectonic evolution and differential deformation characteristics and their control on oilfield water distribution in the western Qaidam basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(2): 28~34 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yadong, Zhang Tao, Li Shiyuan, Zheng Jianjing, Guo Jianming, Sun Guoqiang. 2011. Cenozoic tectonic deformation characteristics of the western Qaidam basin recorded by seismic profile. *World Geology*, (2): 213~223 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yadong, Zheng Jianjing, Zhang Weilin, Li Shiyuan, Liu Xingwang, Yang Xin, Liu Yuhu. 2012. Cenozoic uplift of the Tibetan Plateau: evidence from the tectonic-sedimentary evolution of the western Qaidam basin. *Geoscience Frontiers*, 3(2): 175~187.
- Wang Yixuan, Chen Tianyuan, Wu Chan, Lai Zhongping, Guo Shoudong, Cong Lu. 2019. Geochronological study on the sedimentation of Xitaijinar salt lake, Qaidam basin. *Arid Land Geography*, 42(4): 876~884 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yunpu. 1982. *Formation and Research Methods of Deep Brine*. Beijing: Geological Publishing House, 68~69.
- Wei Haizhen, Jiang Shaoyong, Tan Hongbing, Zhang Wenjie, Li Binkai, Yang Tangli. 2014. Boron isotope geochemistry of salt sediments from the Dongtai salt lake in Qaidam basin: boron budget and sources. *Chemical Geology*, 380:74~83.

- Xiao J, Xiao Y K, Jin Z D, He M Y, Liu C Q. 2013. Boron isotope variations and its geochemical application in nature. *Australian Journal of Earth Sciences*, 60:431~447.
- Xiao Yingkai, Wang Yunhui. 1999. Boron isotope geochemistry of salt lake in Qaidam basin, Qinghai Province. *Advances in Natural Science: Communications of State Key Laboratory of Natural Science*, 9(7): 616~618 (in Chinese with English abstract).
- Yu Junqing, Gao Chunliang, Cheng Aiyong, Liu Yong, Zhang Lisa, He Xianhu. 2013. Geomorphic, hydroclimatic and hydrothermal controls on the formation of lithium brine deposits in the Qaidam basin, northern Tibetan Plateau, China. *Ore Geology Reviews*, 50: 171~183.
- Zeng Xu, Lin Tong, Zhou Fei, Li Jie, Zhang Yi, Shen Xiaoshuang, Fang Yongsheng, Wang Ke. 2021. Neogene sedimentary environment and carbon and oxygen isotopic characteristics of carbonate rocks in Yiliping area, Qaidam basin. *Natural Gas Geoscience*, 32(1): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Pengxi. 1987. *Salt Lake of Qaidam basin*. Beijing: Science Press, 32~233 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiyong, Ma Haizhou, Han Yuanhong, Du Zhongmou, Fan Huiping. 2012. Regional differentiation characteristics of underground brine components in Xitaijinar salt lake mining area. *Salt Lake Research*, 20(1): 24~28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tao, Song Chunhui, Wang Yadong, Zheng Haijun, Zhang Zhigao, Wu Song, Meng Qingquan, Fang Xiaomin. 2012. Late Cenozoic tectonic deformation and its significance in the western Qaidam basin. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 312~321 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Fan, Sun Deqiang, Yan Cunfeng, Zhang Xiaojun, Sun Songling, Ni Xianglong, Cheng Yuhong. 2013. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution and its relationship with hydrocarbon accumulation in Qaidam basin. *Natural Gas Geoscience*, 24(5): 940~947 (in Chinese with English abstract).
- ### 参 考 文 献
- 陈宣华, 尹安, George Gehrels, 李丽, 蒋荣宝. 2011. 柴达木盆地东部基底花岗岩类岩浆活动的化学地球动力学. *地质学报*, 85(2): 157~171.
- 戴俊生, 曹代勇. 2000. 柴达木盆地新生代构造样式的演化特点. *地质评论*, 46(5): 455~460.
- 戴俊生, 叶兴树, 汤良杰, 金之钧, 邵文斌, 胡勇, 张兵山. 2003. 柴达木盆地构造分区及其油气远景. *地质科学*, 38(3): 291~296.
- 党玉琪, 张道伟, 徐子远, 侯泽生. 2004. 柴达木盆地三湖地区第四系沉积相与生物气成藏. *古地质量报*, 6(1): 110~118.
- 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.
- 高东林, 马海州, 张西营, 韩凤清, 周筠珩. 2006. 西台吉乃尔盐湖地下卤水的赋存特征. *盐湖研究*, 14(2): 1~6.
- 高春亮, 余俊清, 展大鹏, 张丽莎, 成艾颖. 2009. 柴达木盆地盐湖硼矿资源的形成和分布特征. *盐湖研究*, 17(4): 6~13.
- 韩佳君, 周训, 姜长龙, 胡良君, 方斌, 孙琦. 2013. 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.
- 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, 李廷伟, 彭喜明, 韩元红, 李中平, 马海州. 2014. 柴达木盆地西部第三系油田水水文地球化学特征. *石油与天然气地质*, 35(1): 50~55.
- 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.
- 李贤庆, 侯读杰, 唐友军, 胡国艺, 张爱云. 2002. 地层流体化学成分与天然气藏的关系初探——以鄂尔多斯盆地中部大气田为例. *断块油气田*, 9(5): 1~4.
- 李廷伟, 谭红兵, 樊启顺. 2006. 柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及成因分析. *盐湖研究*, 14(4): 26~32.
- 李廷伟, 李建森, 马海州, 李斌凯. 2013. 柴达木盆地西部油田卤水硼同位素地球化学研究. *盐湖研究*, 21(2): 1~9.
- 刘泽纯, 王建, 汪永进, 孙世英, 陈延安, 张建新, 姜文英, 范连顺, 李建青, 杨藩, 屈平彦, 陈怀录. 1996. 柴达木盆地茫崖凹陷井下第三系的年代地层学与气候地层学研究. *地层学杂志*, (2): 104~113.
- 刘溪溪, 岳鑫, 袁文虎, 范增林, 于小亮, 董启伟, 陈金牛. 2019. 柴达木盆地西部狮子沟背斜构造区深部卤水水化学特征及演化分析. *盐湖研究*, 27(1): 73~71.
- 柳祖汉, 吴根耀, 杨孟达, 郭泽, 温志峰. 2006. 柴达木盆地西部新生代沉积特征及其对阿尔金断裂走滑活动的响应. *地质科学*, 41(2): 344~354.
- 石国成, 张西营, 李永寿, 唐启亮, 苗卫良, 李雯霞, 薛园, 李园. 2016. 柴达木盆地北缘冷湖四号构造油田水水化学组成及其分布特征. *盐湖研究*, 24(2): 19~25.
- 苏妮娜, 金振奎, 宋璠, 顾军锋, 陈英, 张卫丹. 2014. 柴达木盆地古近系沉积相研究. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 38(3): 1~9.
- 孙知明, 杨振宇, 葛肖虹, 裴军令, 郭新传, 李伟民, 马志强, 徐树金. 2004. 柴达木盆地西北缘古近系磁性年代研究进展. *地质通报*, 23(10): 899~902.
- 汤良杰, 金之钧, 张明利, 刘池阳, 吴汉宁, 由福报, 张兵山. 2000. 柴达木盆地构造古地理分析. *地学前缘*, 7(4): 421~429.
- 王步清. 2006. 柴达木盆地新生代构造演化与沉积特征. *新疆石油地质*, 27(6): 670~672.
- 王琳霖, 于冬冬, 浮韵, 严敏. 2020. 柴达木盆地西部构造演化与差异变形特征及对油田水分布的控制. *石油实验地质*, 42(2): 28~34.
- 王懿萱, 陈天源, 吴蝉, 赖忠平, 郭守栋, 丛禄. 2019. 柴达木盆地西台吉乃尔盐湖沉积的年代学研究. *干旱区地理*, 42(4): 876~884.
- 王亚东, 张涛, 李仕远, 李仕远, 郑建京, 郭建明, 孙国强. 2011. 地震剖面记录的柴达木盆地西部地区新生代构造变形特征. *世界地质*, (2): 213~223.
- 汪蕴璞. 1982. *深层卤水形成问题及研究方法*. 北京: 地质出版社, 68~69.
- 肖应凯, 王蕴慧. 1999. 青海柴达木盆地盐湖硼同位素地球化学研究. *自然科学进展: 国家重点实验室通讯*, 9(7): 616~618.
- 曾旭, 林潼, 周飞, 李洁, 张懿, 沈晓双, 房永生, 王科. 2021. 柴达木盆地一里坪地区新近系沉积环境及碳酸盐岩碳氧同位素特征. *天然气地球科学*, 32(1): 1~13.
- 张西营, 马海州, 韩元红, 杜仲谋, 范惠萍. 2012. 西台吉乃尔盐湖矿区地下卤水组分区域分异特征. *盐湖研究*, 20(1): 24~28.
- 张涛, 宋春晖, 王亚东, 郑海军, 张志高, 吴松, 孟庆泉, 方小敏. 2012. 柴达木盆地西部地区晚新生代构造变形及其意义. *地学前缘*, 19(5): 312~321.
- 张彭熹. 1987. *柴达木盆地盐湖*. 北京: 科学出版社, 32~233.
- 赵凡, 孙德强, 闫存凤, 张小军, 孙松领, 倪祥龙, 程玉红. 2013. 柴达木盆地中新代构造演化及其与油气成藏关系. *天然气地球科学*, 24(5): 940~947.

**A preliminary investigation of hydrochemical characteristics
and genesis of deep brine in the central Qaidam basin**

LU Jun^{1,2)}, PAN Tong³⁾, LI Yongshou¹⁾, LI Hongpu⁴⁾, HAN Guang⁴⁾,
MIAO Weiliang¹⁾, ZHANG Xiyong^{*1,2)}

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

2) *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3) *Bureau of Geology Exploration and Development of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810001, China;*

4) *Qaidam Comprehensive Geological and Mineral Exploration Institute of Qinghai Province, Qinghai Provincial Key Laboratory of Exploration Research of Salt Lake Resources in Qaidam Basin, Golmud, Qinghai 816005, China*

** Corresponding author: xyzhchina@isl.ac.cn*

Abstract

There are abundant deep brine resources in the western Qaidam basin with good prospect of exploitation and utilization. However, previous studies have mainly focused on the western and northern Qaidam basin, and little is known about the occurrence and formation mechanism of deep brine in the central part of Qaidam basin. In this study, the deep brine samples from the Yiliping and the Xitaijinar salt lakes in the central Qaidam basin were investigated. The hydrochemistry and B isotopic composition of the deep brine samples obtained from deep drilling in this area were analysed, and the hydrogeochemical characteristics of the deep brine in the central Qaidam basin were clarified and the origin of the deep brine is discussed. The analysis results show that the deep brine in the middle of the basin has high salinity and is CaCl₂ type water body. Based on the systematic analysis of the deep brine in the study area, it is found that the formation of the deep brine in the central part of the basin is related to the dissolution and filtration of rock salt and the strong metamorphism under the confined formation conditions. It is suggested that the B isotope was imported from Kunlun Mountain hot spring waters. The different sources of normal and trace elements reflect the “dual structure” characteristics of the material sources of deep brine. The results of this study will provide an important scientific basis for understanding the formation mechanism of deep brine in the whole Qaidam basin.

Key words: Qaidam basin; Yiliping-Xitaijinar salt lake; deep brine; water chemistry; boron isotope