

文章编号: 1000-0550(2019)03-0532-09

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.160

马海盆地深部孔隙卤水矿床水化学特征及成因

岳鑫^{1,2}, 刘溪溪^{1,2}, 路亮¹, 张晓冬^{1,2}, 范增林^{1,2}, 于小亮³

1.青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海格尔木 816000

2.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 816000

3.青海省地质调查局, 西宁 810000

摘要 通过数理统计、聚类以及离子特征系数等分析方法,对柴达木马海盆地的深部砂砾石层孔隙卤水水化学特征进行了分析。卤水离子浓度空间分布特征表现为 pH、Cl⁻、TDS 和 Na⁺ 浓度值变化范围较小,分布均匀,而 K⁺、Rb⁺ 以及 Br⁻、Mg²⁺、Li⁺、Sr²⁺、I⁻、B₂O₃、Ca²⁺、Cs⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 等离子浓度分布不均匀,差异显著;Cl⁻、TDS、Na⁺、K⁺、Mg²⁺ 和 Li⁺ 与 SO₄²⁻ 聚为一个亚类,表明卤水演化过程中有酸性液体的参与;K⁺ 含量自西向东有增大的趋势,与 Mg²⁺ 和 Li⁺ 的变化具有相关性;离子特征系数反映出蒸发残余及盐岩溶解的多源性特征。研究区水化学类型为单一的氯化钠型,这种单一的物源可能与推测的更新统下伏盐岩层有关。

关键词 马海盆地;砂砾石层;深部孔隙卤水;水化学特征;成因分析

第一作者简介 岳鑫,男,1987 年出生,工程师,矿产勘查及盐湖研究,E-mail: 369525736@qq.com

中图分类号 P619.21⁺1 **文献标志码** A

0 引言

深部砂砾石层孔隙卤水是新型的钾盐矿资源,为我国近年来盐湖找钾的又一重大发现^[1-3],具有水位埋藏浅,富水性强,矿化度高,结盐程度低,易开发等特点,具有重大研究意义,可作为我国钾盐开发的后备基地。

马海盆地位于柴达木盆地西北部,沿赛什腾山分布的巨大冲洪积扇群,为更新世以来的砂砾石,是深部孔隙卤水的储卤介质,前人研究了马海地区湖表卤水及盐类矿物^[4],进行了蒸发实验^[5-6]及高温梯级蒸发实验^[7],分析地球化学特征成因^[8]、沉积环境^[9]、勘查研究进展^[10]及第四纪沉积环境^[11],但研究范围仅限于湖表及 315 m 以浅。自 2011 年我国首次在柴达木西部发现砂砾石层孔隙卤水以来,先后对柴达木盆地西部^[12]的黑北凹地^[13]及南翼山^[14]地区该类型卤水做过水化学特征与成因分析,然而对马海地区深部新型的砂砾石层孔隙卤水矿床的研究还处于空白阶段。本文以马海地区深部 200~2 000 m 的新型砂砾石层孔隙卤水为研究对象,分析其化学特征及成因。

1 地质背景

1.1 水文地质环境

北东为柴达木北缘台缘褶皱分布带之一,小赛什

腾山、赛什腾山、绿梁山为柴北缘残山断褶带之西段,褶皱断裂构造发育。该残山断褶带南北为柴达木盆地台坳的一部分,褶皱断裂构造较发育,并分布着数个卤水湖。区内地下水按赋存介质不同分为松散岩类孔隙水、化学盐类晶间水和碎屑岩类裂隙孔隙水三个类型。各类型地下水按水力性质、赋存层位不同进一步可分为潜水和承压水,本文研究主要针对于松散岩类孔隙水的承压水层位。

马海盆地属于盆内盆地,研究区(图 1)分布地层为第四系,自赛什腾山南缘至冷七构造北缘分布岩性依次为全新统冲洪积相(Q_h^{al+pl})的砂、砾石和碎屑堆积,湖沼化学沉积相(Q_h^{ch+th})的淤泥、黏土及含石盐(芒硝)的淤泥,上更新统湖积相(Q_{p3}¹)的含石膏的粉砂,中更新统湖积相(Q_{p2}¹)的含石膏粉砂之黏土,下更新统湖积相(Q_{p1}¹)的砂质泥岩夹砂岩。

通过研究区内钻孔(图 2)对地层的揭露,区内中部至西部属山前冲洪积相和盆地湖积相沉积,富水层位岩性分别为:上层全新世含砾的中粗砂、砾砂、含砂的角砾,中层晚更新世含砾的中细砂,下层中更新世中砂、细砂,为孔隙卤水的储卤介质。而区内东部钻孔揭露地层为滨湖相的黏土粉砂层。

1.2 卤水赋存特征

沿赛什腾山南缘由西向东呈直线分布的一系列浅部钻孔控制长度大于 30 km,揭露了山前的晶间卤

收稿日期: 2018-01-23; 收修改稿日期: 2018-08-01

基金项目: 中国地质调查局项目(121201103000150011); 青海省地勘基金项目 [Foundation: China Geological Survey Project, No. 121201103000150011; Project of Qinghai Geological Exploration Fund]

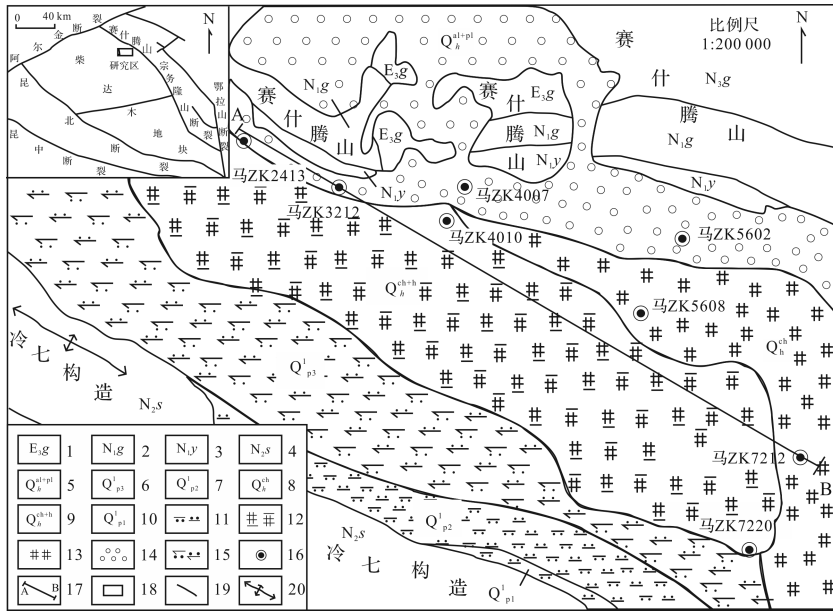


图1 马海盆地区域地质图

1. 渐新统下干柴沟组; 2. 上新统狮子沟组; 3. 中新统上干柴沟组; 4. 中新统下油砂山组; 5. 全新统冲洪积物; 6. 中更新统湖积物;
7. 上更新统湖积物; 8. 全新统化学沉积; 9. 全新统湖沼化学沉积; 10. 下更新统湖积物; 11. 湖积相区; 12. 干盐湖外缘; 13. 干盐湖区域;
14. 山前冲洪积扇; 15. 湖积相区外缘; 16. 钻孔位置; 17. 图2位置; 18. 研究区; 19. 地质界限; 20. 背斜构造

Fig.1 Regional geological map of Mahai Basin

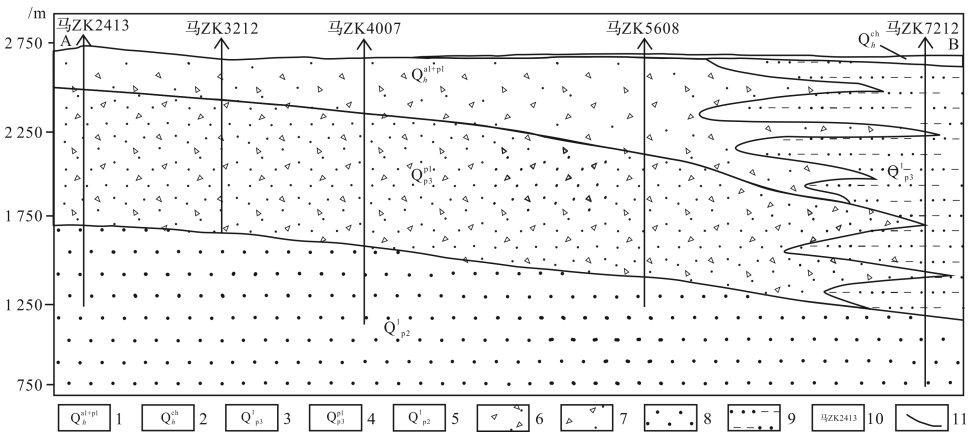


图2 研究区地层纵剖面图

1. 全新统冲洪积相; 2. 全新统化学沉积相; 3. 上更新统湖积相; 4. 中更新统洪积相; 5. 下更新统湖积相; 6. 含砾石(角砾)的中粗砂;
7. 含砾的中粗(细)砂; 8. 中粗(细)砂; 9. 黏土粉砂; 10. 钻孔位置及编号; 11. 地质界限

Fig.2 Stratigraphic longitudinal profile of the research area

水矿层。该层特点是 KCl 品位高, 储量大, 现已处于开采阶段。

赛什腾山南缘山前由西向东分布的马 ZK2413 (1 500 m)、马 ZK3212 (800 m)、马 ZK4010 (1 400 m)、马 ZK4007 (1 500 m)、马 ZK5608 (1 400 m)、马 ZK5602 (1 600 m)、马 ZK7220 (1 250 m) 及马 ZK7212 (2 000 m) 等钻孔控制了该区域的孔隙卤水矿层。长

度约 48 km, 宽约 6~18 km, 分布面积大于 500 km², 含水层纯厚度除马 ZK7220 较薄外, 纯厚度达 85.81~823.54 m, 矿化度达 236.75~313.01 g/L, KCl 品位 0.13%~0.90%, NaCl 品位 16.60%~21.59%, MgCl₂ 品位 1.69%~3.34%, 水化学类型为氯化物型, 单井涌水量 146.88~4544.64 m³/d, 富水性强, 降深 38.19~112.17 m, 具有水量大、不结盐、水位埋藏浅易开发的

特点,利于开发研究。

2 采样及试验结果

2.1 采样位置及方法

钻孔完成取芯后,用拉活塞等方法洗孔,至水清砂净,进行抽水试验并采样。本次研究对象为深层卤水,为防止浅部水体的影响,在各施工钻孔 150~300 m 位置选择厚度较大的隔水层进行止水。样品在更新世至全新世的冲洪积相和湖积相沉积储卤地层中采集,详见表 1。

抽水试验过程中每隔 4 小时采集一个水样。用蒸馏水洗净的瓶子盛取 1 000 mL 后及时封瓶,注明编号,送至青海省柴达木综合地质矿产勘查院岩矿测试中心进行测试分析。

2.2 试验结果

本次卤水样品的测试项目有 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 、 B_2O_3 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Rb^+ 、 Cs^+ 、 Sr^{2+} 、 Br^- 、 I^- 、 NO_3^- 等离子成分含量,溶液的 pH 值、密度以及矿化度(TDS)等。其中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 、 B_2O_3 、 Cl^- 、 HCO_3^- 等常量离子成分用常规重量法(误差 0.5%)和滴定法(误差 0.2%~0.3%)测定; Li^+ 、 Br^- 、 Sr^{2+} 等微量离子成分采用原子吸收光谱法(误差小于 2%); B^{3+} 离子含量采用吸光光度法(误差小于 1%)。具体试验结果见表 1。

3 实验结果分析

为了解柴达木盆地马海地区深部卤水的离子分布规律,对研究区内 8 个钻孔内共计 27 组样品进行

表 1 研究区钻孔全分析离子含量

Table 1 Drilling multiple analysis results of sample ion contents in the research area

样号	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	B_2O_3	Li^+	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Rb^+	Cs^+	Sr^{2+}	Br^-	I^-	NO_3^-	密度	TDS	pH
	$\rho(B)$ g/L						$\rho(B)$ mg/L						g/mL	$\rho(B)$ g/L					
1	0.82	86.83	5.93	5.12	157.67	1.40	63.96	2.57	0.00	1.48	0.10	<0.05	95.14	30.33	5.57	8.24	1.17	257.97	7.47
2	0.83	86.65	5.88	5.02	157.67	1.42	61.96	2.57	0.00	0.00	0.10	<0.05	95.40	29.83	5.46	7.80	1.16	257.67	7.49
3	0.82	87.08	5.97	5.12	158.11	1.38	65.96	2.57	0.00	0.00	0.14	<0.05	96.89	29.83	5.27	8.00	1.17	258.70	7.36
4	0.82	86.29	5.87	5.04	156.32	1.41	63.96	2.57	0.00	1.73	0.13	<0.05	96.26	30.10	5.27	8.40	1.16	255.95	7.44
5	0.83	86.83	5.96	5.08	158.11	1.40	65.96	2.57	0.00	0.00	0.11	<0.05	95.14	29.00	4.98	8.68	1.16	258.41	7.50
6	0.81	85.27	5.80	5.03	155.87	1.38	59.96	2.56	0.00	0.00	0.11	<0.05	96.03	30.10	5.20	8.50	1.16	254.36	7.50
7	1.74	87.86	4.55	6.53	161.07	2.19	78.95	3.24	0.00	22.85	0.21	<0.05	70.06	32.62	3.80	12.50	1.17	264.04	7.19
8	2.19	85.06	3.86	6.98	157.51	3.04	92.11	3.86	0.00	14.52	0.33	<0.05	66.37	35.88	3.60	11.92	1.16	258.75	7.27
9	2.16	84.99	3.89	6.83	155.73	2.96	92.11	3.82	0.00	18.68	0.33	<0.05	65.73	33.38	3.55	11.92	1.17	256.66	7.33
10	2.02	84.94	4.19	6.75	157.51	2.86	89.48	3.59	0.00	19.09	0.24	<0.05	71.51	36.75	3.78	11.80	1.17	258.37	7.40
11	2.13	85.45	3.94	6.82	156.62	2.83	92.11	3.73	0.00	19.09	0.27	<0.05	64.42	35.00	3.80	12.82	1.17	257.89	7.18
12	2.57	78.43	3.19	7.51	146.81	3.10	91.27	4.76	0.00	21.93	0.60	<0.05	63.51	30.67	2.98	4.30	1.17	241.71	7.42
13	2.48	76.28	3.09	7.35	144.32	3.11	95.97	4.81	0.00	13.70	0.58	<0.05	63.01	30.33	3.22	6.30	1.17	236.75	7.32
14	2.59	78.22	3.20	7.50	147.64	3.20	92.21	4.84	0.00	13.70	0.59	<0.05	65.71	29.33	3.17	5.40	1.16	242.44	7.32
15	2.57	78.65	3.04	7.64	146.81	3.22	95.97	4.82	0.00	13.95	0.61	<0.05	64.43	30.67	3.10	5.30	1.17	242.03	7.20
16	2.56	78.52	3.14	7.47	147.64	3.14	96.91	4.80	0.00	17.44	0.59	<0.05	66.16	29.33	3.12	5.70	1.17	242.58	7.28
17	2.55	77.38	3.20	7.63	144.73	3.31	93.15	4.72	0.00	19.56	0.58	<0.05	65.96	29.67	3.07	5.30	1.15	238.91	7.30
18	2.63	79.53	3.16	7.77	148.47	3.19	95.03	4.84	0.00	19.81	0.59	<0.05	63.95	29.33	3.08	6.10	1.17	244.86	7.20
19	3.03	91.15	4.21	7.47	172.70	1.97	84.15	3.60	0.00	7.50	0.71	<0.10	61.33	37.83	3.75	5.10	1.19	280.73	7.53
20	3.10	93.90	4.29	7.72	171.33	1.96	86.86	3.66	0.00	0.00	0.74	<0.10	59.48	35.83	3.65	4.50	1.19	282.49	7.58
21	3.71	103.02	3.11	8.12	188.06	2.32	91.94	2.82	0.00	0.00	0.68	<0.05	56.48	44.20	4.25	10.02	1.20	308.43	7.82
22	3.65	103.24	3.34	8.20	188.51	2.47	87.95	2.80	0.00	0.00	0.65	<0.05	58.38	44.20	4.50	11.33	1.20	309.51	7.94
23	2.58	79.71	4.28	7.99	153.22	1.70	27.78	2.34	0.00	48.02	<0.10	<0.10	57.63	34.25	3.15	10.05	1.16	249.54	7.17
24	2.66	80.62	4.37	8.15	154.04	2.03	27.78	2.29	0.00	52.37	<0.10	<0.10	58.93	34.00	3.20	10.85	1.17	251.93	6.99
25	2.99	93.15	4.12	8.25	174.94	2.58	92.79	4.20	0.00	0.00	0.13	<0.05	57.48	36.96	7.17	9.70	1.17	286.25	7.40
26	5.68	101.02	1.66	10.47	190.30	3.74	141.91	4.70	0.00	0.00	1.18	<0.05	39.84	46.00	5.00	12.40	1.20	313.01	7.11
27	5.50	100.56	1.80	10.08	187.62	3.67	133.92	4.53	0.00	0.00	1.08	0.09	40.75	46.00	5.20	11.50	1.20	309.35	7.58

注:1~6;马 ZK2413SQ01—马 ZK2413SQ06(157~1 500 m);7~11;马 ZK3212SQ01—马 ZK3212SQ05(151~800 m);12~18;马 ZK4007SQ01—马 ZK4007SQ07(156~1 500 m);19~20;马 ZK4010 混 ISQ01—马 ZK4010 混 ISQ02(170~1 400 m);21~22;马 ZK5608W1-1SQ01—马 ZK5608W1-1SQ02(200~778 m);23~24;马 ZK5602SQ01—马 ZK5602SQ02(200~1 600 m);25;ZK7220 混 SQ01(170~1250 m);26~27;马 ZK7212W1-1SQ01—马 ZK7212W1-1SQ02(275~810 m);括号内为采样位置。

分析研究,运用统计学方法分析样品中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 、 B_2O_3 、 Rb^+ 、 Cs^+ 、 Sr^{2+} 、 Br^- 、 I^- 、 NO_3^- 等离子的分布特征及 TDS 变化规律。

3.1 数理分析

深部卤水中各种元素呈离子状态,影响其分布的因素较多,元素含量及分布特征差异也较大,因此可运用均匀性以及判断其是否服从正态分布来衡量其分布特征^[9,15]。

以马海地区深部卤水的全分析离子含量(表1)为基础,通过数理统计计算其化学成分的变异系数(C_v)、偏差系数(C_s)和峰度系数(b_k)(表2),进而研究其分布特征。

表2 研究区孔隙卤水离子分布特征

Table 2 Distribution characteristics of pore brine ions in the research area

成份	$C_v/\%$	C_s	b_k	特征
密度	1.20	1.03	3.49	弱变异正偏高峰态
pH	2.80	0.77	4.25	弱变异正偏高峰态
Cl^-	8.82	1.05	3.01	弱变异正偏高峰态
TDS	8.82	1.11	3.12	弱变异正偏高峰态
Na^+	9.24	0.82	2.85	弱变异正偏低峰态
Br^-	15.85	1.17	3.32	中等变异正偏高峰态
Mg^{2+}	19.91	0.13	3.26	中等变异正偏高峰态
Sr^{2+}	23.75	0.62	2.78	中等变异正偏低峰态
I^-	25.99	0.96	3.52	中等变异正偏高峰态
Li^+	26.25	0.00	1.36	中等变异正态低峰态
B_2O_3	29.50	-0.19	4.64	中等变异负偏高峰态
Ca^{2+}	30.37	0.19	2.53	中等变异正偏低峰态
SO_4^{2-}	31.38	-0.17	1.64	中等变异负偏低峰态
NO_3^-	32.46	-0.08	1.56	中等变异负偏低峰态
K^+	51.23	0.86	4.40	强变异正偏高峰态
Rb^+	67.56	0.63	2.91	强变异正偏低峰态
HCO_3^-	116.53	1.45	5.33	强变异正偏高峰态

变异系数 C_v 的计算公式:

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

其中, \bar{X} : 离子浓度的算术平均值; S : 离子分析值的标准偏差; n : 样品数量; X_i : 某一离子浓度值(下同)。

C_v 是衡量资料中各化学成分分析值变异程度的一个统计量,反映了分析值离散程度的绝对值,一般来说 C_v 值平均水平越高,则其离散程度的测度值就越大,反之越小。

偏差系数 C_s 与峰度系数 b_k 的计算公式:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n\bar{X}^3 C_v^3} \quad (3)$$

$$b_k = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{(n-1)S^4} \quad (4)$$

偏差系数 C_s 可以反映卤水中元素浓度的频率分布函数曲线的对称情况,即 C_s 的绝对值越大,其对应的函数曲线偏斜越严重,反之则越接近正态分布,峰度系数 b_k 可以反映卤水中元素频数分布函数曲线顶端尖锐或扁平的程度。

利用数理统计方法中的偏差系数和峰度系数,判断卤水中各元素浓度的频率分布曲线是否符合正态分布以研究卤水中元素的分布特征,偏差系数 $C_s > 0$ 时称为正偏分配, $C_s < 0$ 时称为负偏分配,峰度系数 $b_k > 3$ 称分布具有过度的峰度, $b_k < 3$ 称分布具有不足的峰度,当 $C_s = 0, b_k = 3$ 时则认为属于正态分布。

将研究区内深部卤水各离子成分按照变异系数(C_v)由小到大顺序排列(表2),以 C_v 值 10% 和 50% 为界,将卤水离子含量变化分为弱变异、中等变异和强变异三组,变异系数强弱的不同表明深部卤水中离子浓度的变化幅度不同,也就意味着具有强变异的离子分布不均匀。

3.2 离子含量特征

深部卤水常量离子中 K^+ 的含量在 0.79~5.98 g/L 之间,开采卤水矿中 KCl 边界品位为 $\geq 0.3\%$ ~0.5%,工业品位为 $\geq 0.5\%$ ~1% (据《盐湖和盐类矿产地质勘查规范》)。除钻孔马 ZK2413 的 K^+ 含量较低外,其余钻孔中 K^+ 的含量均达到边界品位,钻孔马 ZK7212、马 ZK5608 及马 ZK4010 等已达到工业品位,且钻孔马 ZK7212 和马 ZK5608 中卤水 KCl 达 0.95% 和 0.59%,远超工业品位。各钻孔中 K^+ 的含量呈现出赛什腾山南缘山前由西到东逐渐变大的趋势。常量离子 Na^+ 含量在 76.28~102.27 g/L 之间,达到工业品位。卤水中 Mg^{2+} 含量在 4.92~10.82 g/L 之间,除钻孔马 ZK2413 较低外,其余均达到边界品位($MgCl_2$ 边界品位 $\geq 2\%$)。 Ca^{2+} 含量在 1.50~5.97 g/L 之间,含量较低。 Cl^- 含量在 144.32~192.08 g/L 之间,分布较为均匀。 SO_4^{2-} 含量在 1.31~4.94 g/L 之间,含量较低。研究区各钻孔所揭露的深部卤水 TDS 介于 236.75~316.79 g/L 之间,分布较均匀,大体呈现出由西到东逐渐增大的趋势,卤水 TDS 除钻孔马 ZK4007 分布于 236.75~244.86 g/L 外,其余均大于 250 g/L,

属于高矿化度(表1)。微量离子中 Br^- 含量在 18.62~46.50 mg/L 之间,平均值 33.61 mg/L,其含量较高; B_2O_3 含量在 57.97~147.91 mg/L 之间,平均值为 84.64 mg/L,含量较高; Sr^{2+} 含量在 30.77~96.89 mg/L 之间,平均值 67.16 mg/L,其含量偏高; Rb^+ 含量除马 ZK5602、马 ZK7220 及马 ZK2413 孔较小外,一般在 0.21~1.26 mg/L 之间。 I^- 含量 3.01~8.25 mg/L 之间,平均值 4.13 mg/L。

3.3 离子分布及变化特征

表2中可以看出密度、pH、 Cl^- 、TDS 和 Na^+ 呈弱变异,表明其在深部卤水的变化范围较小,分布均匀。青藏高原盐湖卤水的 pH 值一般集中在 7~9,呈中碱性,其中以柴达木盆地地区卤水 pH 低^[16]。 Br^- 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 、 Sr^{2+} 、 I^- 、 B_2O_3 、 Ca^{2+} 、 Cs^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等离子变异系数较前者稍大,表明这些离子在深部卤水中相对分布较不均匀。 K^+ 、 Rb^+ 两者变异系数大于 50%,表明其在深部卤水中分布相对不均匀,即马海地区 K^+ 有迁移聚集情况,赛什腾山前施工钻孔揭露卤水显示 K^+ 含量呈现出西低东高,向湖积中心迁移的趋势。

表2可见,深部卤水中密度、pH、 Cl^- 、TDS 及 Na^+ 呈弱变异,且密度、pH、 Cl^- 及 TDS 呈正偏高峰态, Na^+ 呈正偏低峰态, Br^- 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 I^- 、 Li^+ 、 B_2O_3 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 呈中等变异,其中 Br^- 、 Mg^{2+} 及 I^- 呈正偏高峰态, Sr^{2+} 和 Ca^{2+} 呈正偏低峰态, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 呈负偏低峰态, B_2O_3 呈负偏高峰态, Li^+ 呈正态的低峰态。 K^+ 、 Rb^+ 和 HCO_3^- 呈强变异,其中 K^+ 和 HCO_3^- 呈正偏高峰态, Rb^+ 呈正偏低峰态。

综合研究区深部卤水主要离子种类,绘制其含量在赛什腾山南缘自西向东的变化曲线(图3),可以看出赛什腾山南缘山前近 50 km 范围内, K^+ 含量自西向东有一个增大的趋势, Na^+ 、 Cl^- 和 TDS 呈现相同的变化趋势, K^+ 、 Mg^{2+} 和 Li^+ 变化趋势相同,同时 Cl^- 、TDS、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Li^+ 与 SO_4^{2-} 变化趋势较一致, Ca^{2+} 和 Sr^{2+} 呈现相同的变化趋势。

3.4 聚类特征

从马海地区深部卤水基本成分聚类分析图(图4)中可以看出, Cl^- 、TDS 和 Na^+ 首先聚为一类, K^+ 、 Mg^{2+} 和 Li^+ 聚为一类,然后 Cl^- 、TDS、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Li^+ 与 SO_4^{2-} 聚为一亚类。 Ca^{2+} 和 Sr^{2+} 聚为一类。

3.5 卤水特征系数

综合分析研究区样品测试结果,推演其特征系数(表3),钠氯系数值为 0.80~0.85,钙镁系数为 0.10~

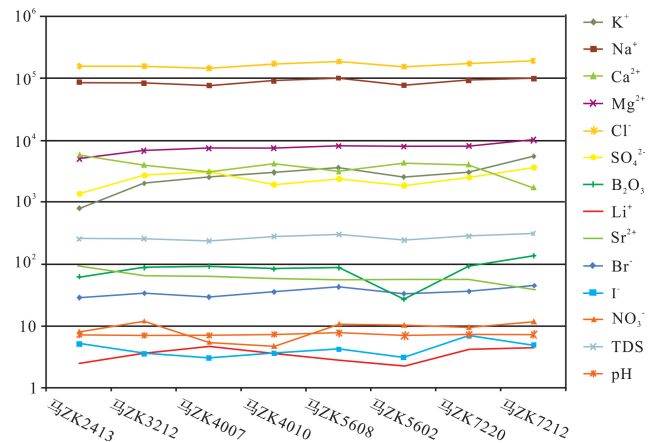


图3 研究区深层卤水主要离子含量纵向变化曲线

Fig.3 Longitudinal variation curve for the main ion contents of deep brine in the research area

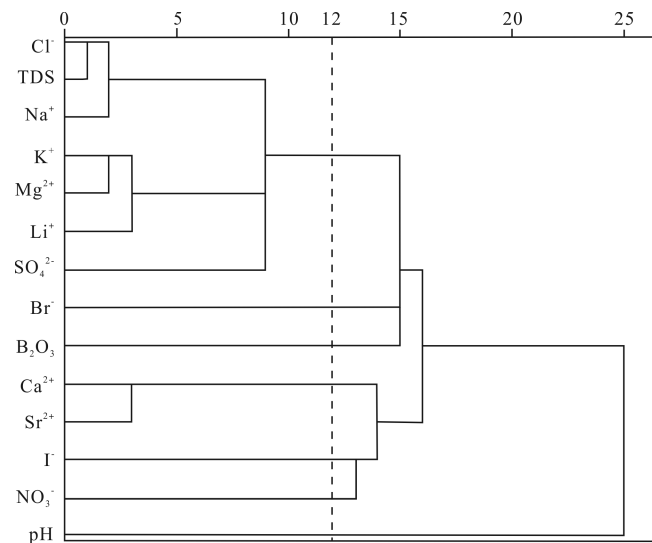


图4 研究区孔隙卤水基本成分聚类分析

Fig.4 Pore brine basic component clustering analysis in the research area

0.71, 脱硫系数 0.32~0.84, 钾氯系数 4.68~27.07, 氯碘系数 $0.94 \times 10^5 \sim 2.10 \times 10^5$, 除 0.94×10^5 外其余数据均大于 1.00×10^5 , 氯溴系数 4 079~5 452。

3.6 介稳相图

深部卤水中的主要阴、阳离子的富含程度和相互作用决定了卤水的水化学类型,即不同水化学类型的卤水具有相应的主要离子组成及水盐平衡体系。

据表4中主要离子组成可以看出研究区的离子平衡体系为 Na^+ 、 K^+ 、 $\text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$ ^[9,17-18]。将研究区样品数据(表4)投影在 Na^+ 、 K^+ 、 $\text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$ 四元体系介稳相图(图5),可见研究区卤水分布在石盐区中低钾镁、高钠的区域,卤水类型为单一的氯化钠型。

表3 研究区钻孔离子特征系数

Table 3 Ion characteristic coefficients from drilling in the research area

样号	钠氯系数	钙镁系数	脱硫系数	钾氯系数	氯碘系数	氯溴系数
1	0.84	0.42	0.50	9.79	1.04×10 ⁵	5 197.76
2	0.83	0.34	0.71	12.63	1.03×10 ⁵	5 284.88
3	0.84	0.35	0.70	12.59	1.06×10 ⁵	5 299.93
4	0.83	0.38	0.67	11.64	1.07×10 ⁵	5 193.29
5	0.84	0.35	0.67	12.31	1.13×10 ⁵	5 452.23
6	0.82	0.26	0.78	15.89	1.01×10 ⁵	5 178.36
7	0.82	0.25	0.80	15.60	1.36×10 ⁵	4 937.66
8	0.82	0.26	0.80	15.88	1.47×10 ⁵	4 389.83
9	0.83	0.24	0.81	15.85	1.48×10 ⁵	4 665.29
10	0.82	0.25	0.79	15.70	1.40×10 ⁵	4 285.91
11	0.82	0.25	0.84	15.97	1.36×10 ⁵	4 474.78
12	0.83	0.25	0.79	16.07	1.78×10 ⁵	4 786.69
13	0.85	0.70	0.33	4.74	1.75×10 ⁵	4 758.31
14	0.85	0.71	0.33	4.80	1.78×10 ⁵	5 033.66
15	0.85	0.71	0.32	4.68	1.83×10 ⁵	4 786.69
16	0.85	0.71	0.33	4.74	1.80×10 ⁵	5 033.66
17	0.85	0.71	0.33	4.75	1.85×10 ⁵	4 878.14
18	0.84	0.70	0.33	4.72	1.81×10 ⁵	5 061.94
19	0.81	0.34	0.42	15.92	1.65×10 ⁵	4 564.63
20	0.85	0.34	0.42	16.38	1.68×10 ⁵	4 781.25
21	0.82	0.30	0.54	15.52	1.47×10 ⁵	4 254.84
22	0.82	0.10	0.72	27.07	1.51×10 ⁵	4 264.95
23	0.83	0.11	0.72	26.56	2.13×10 ⁵	4 473.51
24	0.84	0.23	0.46	17.88	2.10×10 ⁵	4 530.63
25	0.84	0.25	0.48	17.58	0.94×10 ⁵	4 733.35
26	0.80	0.33	0.41	15.29	1.10×10 ⁵	4 136.90
27	0.81	0.32	0.49	15.64	1.06×10 ⁵	4 078.64

表4 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O(25℃)介稳相图指数

Table 4 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O(25℃) of the interface stability phase diagram index

编号	水化学组分/%			相图指数/%		
	KCl/%	NaCl/%	MgCl ₂ /%	KCl%	NaCl/%	MgCl ₂ /%
1	0.13	18.74	1.72	0.631	91.015	8.354
2	0.14	18.85	1.69	0.677	91.151	8.172
3	0.13	18.80	1.72	0.630	91.041	8.329
4	0.13	18.64	1.70	0.635	91.060	8.305
5	0.14	18.84	1.71	0.677	91.058	8.265
6	0.13	18.65	1.70	0.635	91.064	8.301
7	0.28	18.85	2.18	1.314	88.456	10.230
8	0.36	18.54	2.35	1.694	87.247	11.059
9	0.35	18.23	2.29	1.677	87.350	10.973
10	0.33	18.40	2.26	1.572	87.661	10.767
11	0.35	18.34	2.29	1.668	87.417	10.915
12	0.42	16.87	2.52	2.120	85.159	12.721
13	0.41	16.60	2.47	2.105	85.216	12.680
14	0.42	17.04	2.53	2.101	85.243	12.656
15	0.42	16.87	2.57	2.115	84.945	12.941
16	0.42	16.99	2.51	2.108	85.291	12.600
17	0.42	16.84	2.61	2.114	84.751	13.135
18	0.43	17.00	2.61	2.146	84.830	13.024
19	0.49	19.52	2.47	2.180	86.833	10.988
20	0.50	19.46	2.55	2.221	86.450	11.328
21	0.59	21.60	2.65	2.375	86.957	10.668
22	0.58	21.59	2.68	2.334	86.881	10.785
23	0.42	17.17	2.69	2.071	84.665	13.264
24	0.43	17.20	2.74	2.111	84.438	13.451
25	0.49	20.08	2.76	2.100	86.069	11.830
26	0.90	21.21	3.42	3.525	83.079	13.396
27	0.88	21.04	3.30	3.489	83.426	13.085

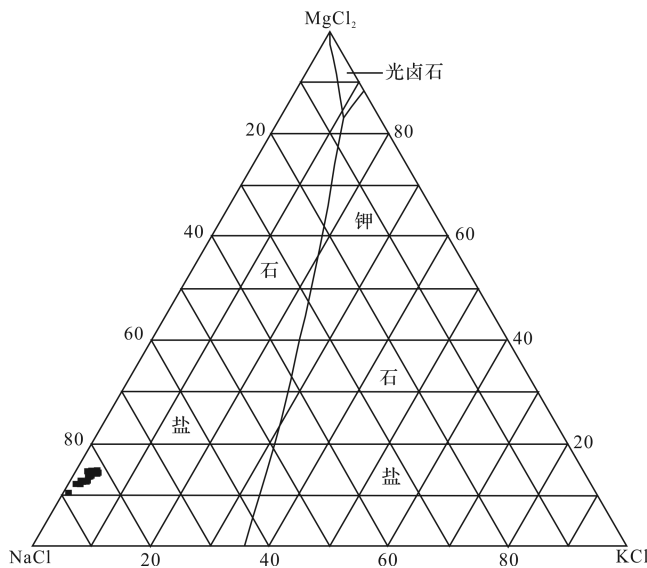


图5 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O(25℃)四元体系介稳相图

Fig.5 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻-H₂O(25℃) from the interface stability phase diagram index table in the research area

4 卤水成因讨论

通过钻孔纵剖面显示,研究区东部地层显示为湖积相区,西部为冲—洪积相区,东南部地表被更新世以来化学沉积物覆盖。

通过数理统计分析,卤水离子浓度空间分布特征显示 pH、Cl⁻、TDS 和 Na⁺ 浓度值变化范围较小,分布均匀,而 K⁺、Rb⁺ 以及 Br⁻、Mg²⁺、Li⁺、Sr²⁺、I⁻、B₂O₃、Ca²⁺、Cs⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻ 离子浓度分布不均匀,差异显著。说明卤水中的 Cl⁻ 和 Na⁺ 已饱和,即水—盐平衡状态,且随着地下水的运移有其他离子的迁入与迁出,同时,综合考虑卤水中离子的峰态分布及聚类特征,卤水演化后期有酸性液体的参与。

离子含量变化曲线图显示 K⁺ 含量自西向东有增大的趋势,Na⁺、Cl⁻ 和 TDS 呈现相同的变化趋势,K⁺、Mg²⁺ 和 Li⁺ 变化趋势相同,同时 Na⁺、Cl⁻、TDS、K⁺、Mg²⁺ 和 Li⁺ 与 SO₄²⁻ 变化趋势较一致,Ca²⁺ 和 Sr²⁺ 呈现

相同的变化趋势,显示这些离子具有一定的相关性,在空间上伴随有离子的迁入与迁出。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 呈现出相反的变化趋势,尤其在东部滨湖相地层中趋势更加明显,究其原因,可能是蒸发残余的古卤水大量析出石膏,从而导致 Ca^{2+} 的大量减少和 Mg^{2+} 的增加($\text{Ca}^{2+} + \text{MgSO}_4 = \text{CaSO}_4 \downarrow + \text{Mg}^{2+}$)。西部由于地层疏松,有大量地表水的注入,碳酸盐胶结物、石膏溶解、白云岩及长石酸性淋滤等水-岩反应的发生,导致较高的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量。

卤水中微量元素也是判断卤水来源的一项重要指标^[19-20],Br元素通常以分散的状态存在于自然界,容易形成易溶于水的化合物,可作为盐湖矿产中最有效、灵敏的特征元素^[21-22]。由于B的易溶性及其分布集中于水圈和上地壳沉积岩,因此其可作为有效的地球化学参数来判断沉积环境及物源^[23-26]。Sr元素在自然界中主要分布在造岩矿物中,是典型的分散元素,可作为有效的地球化学参数来判断古沉积环境及水体补给来源^[27]。因此较高含量的Br、B和Sr元素可间接证明马海盆地深部卤水具有溶盐卤水的补给。

分析卤水离子特征系数可以对其成因做出一定了解^[28-31],海水中的钠氯系数值为0.85~0.87,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。脱硫系数反映地下卤水所处的封闭程度,脱硫系数越小,越接近0,封闭性越好,其还原性越强。钾氯系数反映钾的富集和地下卤水的浓缩程度,判断标准值是75。钙镁系数反映地下卤水变质程度,其数值越高,则反映封闭时间越长,封闭性越好,变质程度越好,其判断标准值为3。氯碘系数大于 10^5 为溶盐地下卤水特征,小于 10^5 为沉积地下卤水特征。新鲜的地表水或浅层地下水体中,氯溴系数为10~150;海洋水体中氯溴系数为299~289;典型的岩浆水体中氯溴系数为560~1 000;盐岩的溶解而形成的卤水中氯溴系数为1 000~10 000。

马海地区深部卤水钠氯系数为0.80~0.85,小于0.85,氯溴系数为4 079~5 452,钠氯系数反映其来源为蒸发残余的地下卤水,然而氯溴系数则反映盐岩的溶解的来源,脱硫系数及钙镁系数表明该地区封闭性较差,较低的钾氯系数也反映出研究区地下卤水浓缩程度较低^[32-33],综上,马海地区深部卤水来源为蒸发残余的卤水,由于该地区封闭性较差,受地表淡水的影响,其浓缩程度较差,同时,地表淡水注入的过程中溶滤了大量盐岩,使卤水中 Cl^- 含量增大,由此氯溴系数变大,简言之:马海地区深部卤水是蒸发残余卤

水及盐岩溶滤卤水混合成因的多源性卤水。

$\text{Na}^+、\text{K}^+、\text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$ 四元体系介稳相图中显示 K^+ 和 Mg^{2+} 含量很低, Na^+ 很高,卤水类型为单一的氯化钠型,因此推测卤水物质来源较为单一,流体运移距离较近,交换附近矿物离子,并溶滤研究区附近盐岩后富集成矿。

5 结论

(1) 马海地区砂砾石层孔隙卤水分布规模较大,水位埋藏浅,富水性强,矿化度较高,其中KCl含量达到了可开发利用的要求,加之研究区深部卤水结盐程度小,易开发等特点,马海盆地深部卤水可作为中国钾盐开发的后备基地。

(2) 马海地区深部卤水中钾的品位在横向上具有一定的变化规律,沿赛什腾山南缘山前自西向东,钾的品位越来越高,对今后找钾工作具有一定指导意义。

(3) 马海地区深部卤水既与酸性淋滤等因素有关,也有蒸发残余卤水和盐岩溶滤卤水特点,成因具有典型的多源性特征。

(4) 马海地区深部卤水成矿物质来源:赋存于更新统砂砾石层中的孔隙卤水有蒸发残余卤水特征,推测更新世之前该地区即有古卤水赋存,更新统下伏地层有可能存在盐岩层沉积,为马海盆地深部卤水的一主要物质来源。

参考文献 (References)

- [1] 郑绵平,张雪飞,侯献华,等. 青藏高原晚新生代湖泊地质环境与成盐成藏作用[J]. 地球学报, 2013, 34(2): 129-138. [Zheng Mianping, Zhang Xuefei, Hou Xianhua, et al. Geological environments of the Late Cenozoic lakes and salt-forming and oil-gas pool-forming actions in the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(2): 129-138.]
- [2] 郑绵平. 论中国盐湖[J]. 矿床地质, 2001, 20(2): 181-189. [Zheng Mianping. On saline lakes of China[J]. Mineral Deposits, 2001, 20(2): 181-189.]
- [3] 郑喜玉,刘建华. 新疆盐湖卤水成分及其成因[J]. 地理科学, 1996, 16(2): 115-123. [Zheng Xiyu, Liu Jianhua. The composition and origin of salt lake brines in Xinjiang[J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(2): 115-123.]
- [4] 刘卫国,肖应凯,孙大鹏,等. 马海盐湖区卤水和盐类矿物的氯同位素特征及意义[J]. 盐湖研究, 1995, 3(2): 29-33. [Liu Weiguo, Xiao Yingkai, Sun Dapeng, et al. Characteristics and significance of chlorine isotope of brine and deposits in the Mahai Salt Lakes[J]. Journal of Salt Lake Research, 1995, 3(2): 29-33.]
- [5] 雷延智,潘玉麟. 巴仑马海盐湖低品位卤水自然蒸发试验研究

- [J]. 化工矿物与加工, 2006(6): 11-14. [Lei Yanzhi, Pan Yulin. Natural evaporation of low grade brine in Balunmahai Salt Lake[J]. Industrial Minerals & Processing, 2006(6): 11-14.]
- [6] 郭爱武, 李刚. 马海盐湖卤水自然蒸发实验研究[J]. 盐湖研究, 2008, 16(3): 30-32. [Guo Aiwu, Li Gang. Study on natural evaporation of brine in Mahai Salt Lakes[J]. Journal of Salt Lake Research, 2008, 16(3): 30-32.]
- [7] 潘晓晨, 成怀刚, 程芳琴. 马海盐湖采卤水高温梯级蒸发实验研究[J]. 无机盐工业, 2013, 45(6): 15-18. [Pan Xiaochen, Cheng Huaigang, Cheng Fangqin. Study on stepped high temperature evaporation of dissolved brine in Mahai Salt Lakes[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2013, 45(6): 15-18.]
- [8] 汤玉兰. 青海马海盐湖富钾卤水地球化学特征及其成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. [Tang Yulan. Study on geochemical characteristics and genesis of potassium-rich brine in Mahai Salt Lake in Qinghai province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.]
- [9] 马金元, 胡生忠, 田向东. 柴达木盆地马海钾盐矿床沉积环境与开发[J]. 盐湖研究, 2010, 18(3): 9-17. [Ma Jinyuan, Hu Shengzhong, Tian Xiangdong. Sedimentary environment and exploitation of Mahai potash deposits in Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2010, 18(3): 9-17.]
- [10] 焦鹏程, 张建伟, 姚佛军, 等. 马海盐湖深部卤水钾盐勘查与研究进展[J]. 矿床地质, 2016, 35(6): 1305-1308. [Jiao Pengcheng, Zhang Jianwei, Yao Fojun, et al. Potassium exploration and research progress of deep brine in Mahai Salt Lake[J]. Mineral Deposits, 2016, 35(6): 1305-1308.]
- [11] 王宇涵. 青海柴达木盆地马海盐湖第四纪沉积环境研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016. [Wang Yuhan. Research on sedimentary environment of mohair salt lake in Quaternary in the Qaidam Basin Qinghai province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.]
- [12] 李洪普, 郑绵平. 柴达木盆地西部深层卤水钾盐矿成矿地质特征[J]. 矿床地质, 2014, 39(S1): 935-936. [Li Hongpu, Zheng Mianping. Mineralization geological characteristics of deep brine potassium mine in the west of Qaidam Basin[J]. Mineral Deposits, 2014, 39(S1): 935-936.]
- [13] 李洪普, 郑绵平, 侯献华, 等. 柴达木黑北凹地早更新世新型砂砾层卤水水化学特征与成因[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2014, 39(10): 1333-1342. [Li Hongpu, Zheng Mianping, Hou Xianhua, et al. Hydrochemistry characteristics and origin of new brine sandy gravel in Early Pleistocene of Heibei Concave in Qaidam Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(10): 1333-1342.]
- [14] 李洪普, 郑绵平, 侯献华, 等. 柴达木西部南翼山构造富钾深层卤水矿的控制因素及水化学特征[J]. 地球学报, 2015, 36(1): 41-50. [Li Hongpu, Zheng Mianping, Hou Xianhua, et al. Control factors and water chemical characteristics of potassium-rich deep brine in nanyishan structure of western Qaidam Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2015, 36(1): 41-50.]
- [15] 田向东, 李洪普, 王云生, 等. 柴达木北部新盐带卤水水化学特征研究[J]. 盐业与化工, 2013, 42(12): 8-12. [Tian Xiangdong, Li Hongpu, Wang Yunsheng, et al. Study on the hydrochemical characteristics of the Xinyandai latent brine in the north of Qaidam Basin[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2013, 42(12): 8-12.]
- [16] 郑绵平, 刘喜方. 青藏高原盐湖化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1585-1600. [Zheng Mianping, Liu Xifang. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1585-1600.]
- [17] 张西营, 马海洲, 高东林, 等. 柴达木盆地西台吉乃尔盐湖矿区卤水水化学特征[J]. 盐湖研究, 2007, 15(2): 12-20. [Zhang Xiyang, Ma Haizhou, Gao Donglin, et al. Hydrochemical characteristics of brines in the mining area of West Taijinar Salt Lake in Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2007, 15(2): 12-20.]
- [18] 叶传永, 王志明, 赵世勤, 等. 青海省尕斯库勒盐湖卤水水化学特征初步研究[J]. 盐湖研究, 2013, 21(1): 14-23, 37. [Ye Chuanyong, Wang Zhiming, Zhao Shiqin, et al. Preliminary study of the hydrochemical characteristics of brines in the Gas Hure Salt Lake, Qinghai province[J]. Journal of Salt Lake Research, 2013, 21(1): 14-23, 37.]
- [19] 樊启顺, 马海洲, 谭红兵, 等. 柴达木盆地西部典型地区油田卤水水化学异常及资源评价[J]. 盐湖研究, 2007, 15(4): 6-12. [Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbing, et al. Hydrochemical anomaly and resources evaluation of the oil field brines in the typical area of western Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2007, 15(4): 6-12.]
- [20] 樊启顺, 马海洲, 谭红兵, 等. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 601-611. [Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbing, et al. Characteristics and origin of brines in western Qaidam Basin[J]. Geochimica, 2007, 36(6): 601-611.]
- [21] 单慧媚, 马腾, 刘存富, 等. 有机溴化物的溴同位素测试技术及其生物地球化学指示意义[J]. 地球科学进展, 2011, 26(8): 811-821. [Shan Huimei, Ma Teng, Liu Fucun, et al. An overview of analytical methods of bromine stable isotope (^{81}Br) of BOCs and its significance to biogeochemical cycle[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(8): 811-821.]
- [22] 曾昭华, 曾雪萍. 地下水中溴的形成及其与人群健康的关系[J]. 吉林地质, 2001, 20(1): 57-59. [Zeng Zhaohua, Zeng Xueping. The formation of trace element of Br in groundwater and its relationship with the health of People's community[J]. Jilin Geology, 2001, 20(1): 57-59.]
- [23] 李廷伟, 李建森, 马海洲, 等. 柴达木盆地西部油田卤水硼同位素地球化学研究[J]. 盐湖研究, 2013, 21(2): 1-9. [Li Tingwei, Li Jiansen, Ma Haizhou, et al. Boron isotope geochemical study on oil-field brine in western Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2013, 21(2): 1-9.]
- [24] 肖荣阁, 大井隆夫, 蔡克勤, 等. 硼及硼同位素地球化学在地质研究中的应用[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 361-367. [Xiao

- Rongge, Takao Oi, Cai Keqin, et al. Application of boron and boron isotopic geochemistry in the study of geological process [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(2): 361-367.]
- [25] 马万栋. 塔里木盆地西部岩盐的地球化学特征及钾盐远景区预测研究[D]. 西宁: 中国科学院研究生院(青海盐湖研究所), 2004. [Ma Wandong. The research on geochemical characteristics and potass forecast of halite in western Tarim Basin[D]. Xining: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Salt Lake Institute), 2004.]
- [26] 刘勇平, 周敬, 韩凤清, 等. 青海可可西里东部盐湖湖水化学及沉积特征初步研究[J]. *盐湖研究*, 2009, 17(3): 10-16. [Liu Yongping, Zhou Jing, Han Fengqing, et al. Preliminary study of hydrochemistry and sedimentary characteristics of salt lakes in eastern Hoh Xil region[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2009, 17(3): 10-16.]
- [27] 张西营, 马海洲, 谭红兵. Sr 的地球化学指示意义及其应用[J]. *盐湖研究*, 2002, 10(3): 38-44. [Zhang Xiying, Ma Haizhou, Tan Hongbing. The indicative significance and application of strontium in geochemistry[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2002, 10(3): 38-44.]
- [28] 樊启顺, 马海洲, 谭红兵, 等. 柴达木盆地西部卤水水化学特征与找钾研究[J]. *地球学报*, 2007, 28(5): 446-455. [Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbing, et al. Hydrochemical characteristics of brines and potassium-prospecting researches in western Qaidam Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(5): 446-455.]
- [29] 李廷伟, 谭红兵, 樊启顺. 柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及成因分析[J]. *盐湖研究*, 2006, 14(4): 26-32. [Li Tingwei, Tan Hongbing, Fan Qishun. Hydrochemical characteristics and origin analysis of the underground brines in west Qaidam Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2006, 14(4): 26-32.]
- [30] 韩佳君, 周训, 姜长龙, 等. 柴达木盆地西部地下卤水水化学特征及其起源演化[J]. *现代地质*, 2013, 27(6): 1454-1464. [Han Jiajun, Zhou Xun, Jiang Changlong, et al. Hydrochemical characteristics, origin and evolution of the subsurface brines in western Qaidam Basin[J]. *Geoscience*, 2013, 27(6): 1454-1464.]
- [31] 谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 等. 柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水资源水化学特征及化学演化[J]. *古地理学报*, 2007, 9(3): 313-320. [Tan Hongbing, Cao Chengdong, Li Tingwei, et al. Hydrochemistry characteristics and chemical evolution of oilfield brines of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(3): 313-320.]
- [32] 周训, 曹琴, 尹菲, 等. 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[J]. *地质学报*, 2015, 89(11): 1908-1920. [Zhou Xun, Cao Qin, Yin Fei, et al. Characteristics of the brines and hot springs in the Triassic carbonates in the high and steep fold zone of the eastern Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 1908-1920.]
- [33] 周训. 四川盆地龙女寺储卤构造深层地下卤水的水文地球化学特征及成因[J]. *现代地质*, 1993, 7(1): 83-92. [Zhou Xun. Hydrogeochemical characteristics and formation of subsurface brines of deep aquifers in Longnu temple brine-bearing structure, Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, 1993, 7(1): 83-92.]

Hydrochemical Characteristics and Origin of Deep Pore Brine Deposits in Mahai Basin

YUE Xin^{1,2}, LIU XiXi^{1,2}, LU Liang¹, ZHANG XiaoDong^{1,2}, FAN ZengLin^{1,2}, YU XiaoLiang³

1. Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud, Qinghai 816000, China

2. The Metallogeny and Forecasting Laboratory of Qinghai-Tibet Plateau Salt and Salt Mineral Resources of Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud, Qinghai 816000, China

3. Qinghai Geological Survey, Xining 810000, China

Abstract: Analysis of the hydrochemical characteristics and origin of deep sandy gravel brine in Mahai Basin is based on mathematical statistics, cluster analysis, and ion characteristic coefficients. The spatial distribution characteristics of brine ion concentrations shows that the ion concentrations of pH, Cl⁻, TDS, and Na⁺ have a narrow range of change and uniform distribution, while the ion concentrations of K⁺, Rb⁺, Br⁻, Mg²⁺, Li⁺, Sr²⁺, I⁻, B₂O₃, Ca²⁺, Cs⁺, NO₃⁻, and SO₄²⁻ exhibit significant variation and uneven distribution. Cluster analysis indicates that Cl⁻, TDS, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Li⁺, and SO₄²⁻ piled, which shows the evolution of brine is related to the joining of acid liquid. K⁺, which has correlation with Mg²⁺ and Li⁺, shows an increasing trend from west to east in the variety graph of ion contents. The characteristic coefficients and higher contents of trace ions suggest that the brine has multifocal features of evaporation residue and gypsum dissolution. The Na⁺, K⁺, and Mg²⁺ // Cl⁻-H₂O four-element system mesostationary phase, as well as the analysis of ionic characteristic coefficients in brine, indicate that the hydrochemical type is the single chloride-type, which reflects the single provenance and may have a relationship with the stochastic underlying salt strata of the Pleistocene.

Key words: Mahai Basin; sandy gravel; pore brine; hydrochemistry characteristics; origin analysis