

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*

李洪普¹, 侯献华^{2**}, 郑绵平², 樊 馥², 刘溪溪¹, 王淑丽¹

(1: 青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室, 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 格尔木 816099)

(2: 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037)

摘要: 通过对柴达木盆地西部大浪滩—黑北凹地、察汗斯拉图凹地、昆特依凹地和马海凹地发现的新类型砂砾型深层卤水钾盐矿床进行卤水化学成份和微量元素系统测试和分析、相关同位素测试, 经综合分析和研究后认为, 砂砾型深层卤水钾盐矿床为溶滤—沉积成因类型, 其形成受第四纪砂砾层和古近纪以来古岩盐层的控制。其成矿模式为: 盆地西部从始新世至上新世干旱条件下不断形成的“盐谷”是物源, 早更新世砂砾沉积层是成矿空间, 周围高山融水径流至山前地带, 长年溶滤古近纪以来沉积的岩盐层中的盐类物质, 渗流至砂砾层, 在相对封闭的条件下形成高矿化度卤水, 富集成为砂砾型深层卤水钾盐矿。在今后柴达木盆地开展砂砾型深层卤水钾盐勘查工作时, 应优先选择盆地周缘深大断裂、山前古近纪以来盐类地层和早更新世山前冲洪积扇体同时发育的地区安排布署工作。

关键词: 柴达木盆地; 砂砾型深层卤水; 成矿模式; 找矿方向

Discussion on metallogenic model and prospecting direction of Pleistocene gravel brine Potassium deposit in western Qaidam Basin *

Li Hongpu¹, Hou Xianhua^{2**}, Zheng Mianping², Fan Fu², Liu Xixi¹ & Wang Shuli¹

(1: *Qinghai Provincial Key Laboratory of Exploration Research of Salt Lake Resources in Qaidam Basin, Qinghai Qaidam Integrated Institute of Geology and Mineral Resource Exploration, Golmud 816099, P.R.China*)

(2: *MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, P.R.China*)

Abstract: After comprehensive analysis and research of the chemical, trace elemental and isotopic composition of the new types of graveled pore brine discovered in Dalangtan-Heibei, Chahan Slatu, Kunteyi and Mahai in the western Qaidam Basin, it is believed that this gravel-type brine bearing potassium deposit belongs to leaching sedimentary model, and its formation is controlled by the Quaternary gravel deposit and the paleo-halite formation since the Paleogene. The metallogenic model is as follows: the “salt valley” which was continuously formed under drought conditions in the western part of the basin from the Eocene to the Pliocene became the provenance, and then the early Pleistocene sandy-gravel deposit was forming the ore-bearing space. As the surrounding meltwater runoff to the piedmont zone, it would then percolate into the Quaternary gravel deposit with salts that had been leached from the Paleogene halite formation. Under relatively closed conditions, it transformed into high-salinity brine and finally came into gravel-type brine bearing potassium deposit. Therefore, in the future exploration in Qaidam Basin, priority should be given to areas where at the same time developed the deep faults at the periphery of the basin, the Paleogene halite formation and the early Pleistocene alluvial fan bodies.

Keywords: Qaidam Basin; gravel-type brine; metallogenic model; prospecting direction

* 2021-08-02 收稿; 2021-10-08 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2017YFC0602803)、青海省科技计划项目(2022-ZJ-734)、青海省“昆仑英才高端创新创业人才”高层次人才培养项目(2021-25)、青海省地质矿产勘查开发局计划科研+大地质项目(2018-2-31)和青海省海西州科技局科技支撑计划项目(2019-Q05)联合资助。

** 通信作者; E-mail: hxh2858@126.com.

我国的钾资源短缺,仅占全球钾盐储量的5%,且以第四纪现代盐湖卤水钾矿为主,查明资源储量和基础储量逐年下降,现有钾盐开采矿区保障年限逐步降低,亟需在钾盐资源勘查及新的资源基地建设上加快步伐^[14]. 2008年以来,柴达木盆地西部大浪滩—黑北凹地、察汗斯拉图凹地、昆特依凹地和马海凹地等相继发现的新型更新统砂砾型深层卤水,因其分布广、规模大、富水性较强、易开采等特征^[5],备受专家、学者和投资者的关注. 有研究者通过对大浪滩地区砂砾型深层卤水研究后认为,其是上覆的盐类晶间卤水在高压下运移至砂砾层而形成的^[6];也有学者在黑北凹地通过分析阿尔金山山前古近系和新近系含盐地层特征,将砂砾型深层卤水特征与地质构造、沉积演化历史相结合,提出该卤水中钾元素来源于山前上新统含盐地层,钾元素“承袭山前古盐”聚集成因模式^[5,7]. 另有研究者对黑北凹地砂砾型深层卤水形成提出不同看法,认为其形成与含盐地层和深部的第三系油田水、地热水沿构造裂隙上升运移到砂砾层中有关^[8];还有研究者对昆特依凹地砂砾型深层卤水分析后认为,该卤水是对深部古岩层以及地表晶间层卤水继承而成^[9]. 这些仅对黑北凹地和昆特依凹地两个地区研究的基础上,提出的砂砾型深层卤水的成因,基本观点有3点:一是砂砾型深层卤水是晶间卤水运移至砂砾层后形成的,二是砂砾型深层卤水是地下水溶解古盐径流至深部的砂砾层后形成的,三是砂砾型深层卤水是深部的第三系油田水、地热水沿构造裂隙上升运移到砂砾层中形成的. 以上第1个观点和第3个观点无法解释水化学类型在晶间卤水中为硫酸镁亚型,第三系油田水为氯化钙型,而砂砾型深层卤水中为氯化物型;第2个观点指导柴达木盆地找矿中发挥了重要作用,但不能解释察汗斯拉图凹地从山前向湖盆中心,砂砾型深层卤水钾含量增加的原因;第3个观点不能解释锂和硼含量在第三系油田水中远高于砂砾型深层卤水这一现象. 砂砾型深层卤水勘查和研究工作的深入和资料的丰富为系统研究奠定了基础. 由于对柴达木盆地上更新统砂砾型深层卤水的成因认识有较大的争议,本文重点研究大浪滩—黑北凹地地质特征、元素地球化学特征,并将卤水和古盐层同位素和成盐元素对比分析,进一步分析和探讨,总结砂砾型深层卤水钾盐矿地质特征与成因模式,以指导下一步该类型含钾卤水矿的找矿工作.

1 地质背景

柴达木盆地砂砾型深层卤水钾盐矿床地处塔里木—中朝板块的柴达木地块西部,位于青藏高原隆升带前缘,其北东以赛什腾山—宗务隆山断裂与南祁连山褶皱系相连,北西以阿尔金走滑断裂与塔里木盆地紧邻,南部以昆北断裂与东昆仑造山带相接^[10-11].

柴达木盆地中部存在着一条区域性断裂—柴中断裂,其形成于元古代,是柴南古陆核和柴北增生体之间的地壳缝合带,也是中、新生代以来控制柴达木盆地沉积中心转移的主要断裂之一^[12]. 柴中断裂以北,古近纪、新近纪背斜构造与凹地相间发育,如南翼山、小梁山、尖顶山、大风山等背斜构造,其间分布大浪滩、黑北、察汗斯拉图、昆特依、马海等凹地;柴中断裂以南相对低洼,河流、湖泊发育. 这种独特的地貌特征为柴达木盆地西部、东南部第四纪以来的盐类矿产的形成奠定了基础(图1).

在晚侏罗世燕山运动作用下,受大陆汇聚的影响,柴达木盆地局部拗陷,广泛沉积了河流相—湖相碎屑岩建造;在白垩纪盆地隆升,只在北缘的祁连山山前沉积一套红色粗碎屑岩建造,其从山前向盆地内部沉积厚度逐渐减薄,粒度逐渐变细^[12]. 始新世末期—渐新世初期,喜山运动第一幕作用,印度板块向北朝欧亚板块俯冲,盆地周围隆升,盆地边缘发生扭张断陷,沉积了河流相—滨湖相—浅湖相碎屑岩建造;中新世初期的喜山运动第二幕作用,印度板块继续向北俯冲,盆地扭张断陷持续发生,沉积了滨湖相—中深湖相碎屑岩建造和膏盐岩建造;上新世末—早更新世初期,喜山运动第三幕作用,沿柴中断裂以北发育南翼山、尖顶山、红沟子、大风山、小梁山、黄瓜梁、黑梁子、长尾梁、碱山等多个北西向背斜构造,同时形成固相盐类矿物、高矿化度卤水和丰富的油气藏;更新世,在湖盆边缘的山前沉积了更新统冲洪积相砂砾层建造,向湖盆中心聚集了盐湖相沉积建造^[13-19].

研究区山前分布冲洪积扇相砂砾层,其间赋存砂砾型孔隙卤水;沿冲洪积扇根部的基岩山区分布古近系和新近系岩盐层^[20];靠近湖盆中心地带的砂砾层上部覆盖逐渐增厚的盐湖相沉积层,其间赋存盐类晶间卤水;沿冲洪积扇前缘发育背斜构造,其内有古近系和新近系岩盐层,赋存构造裂隙孔隙卤水^[5,7].

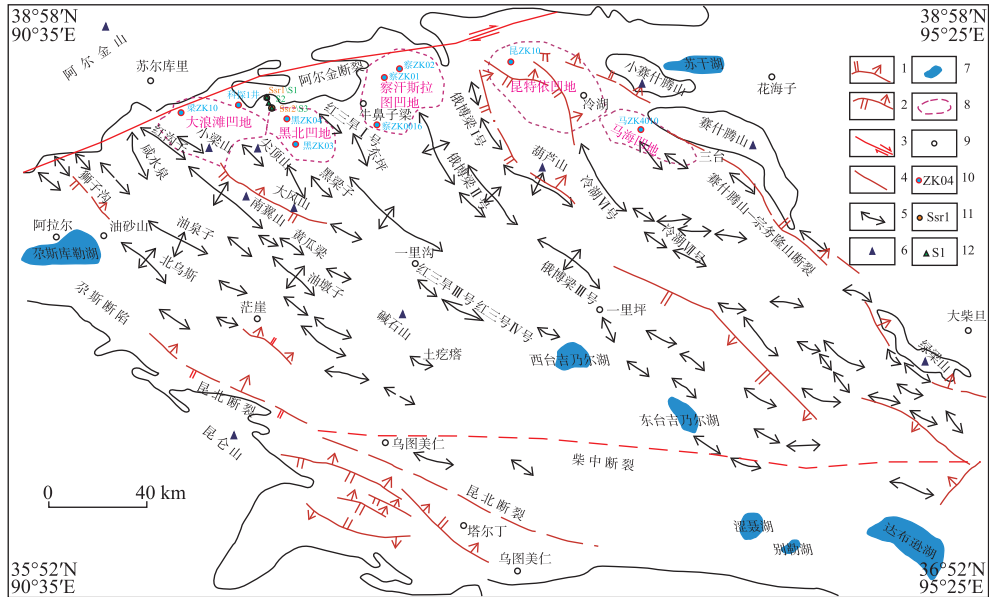


图1 柴达木盆地构造及采样钻孔位置图(1—正断层;2—逆冲断层(裂);3—走滑断层(裂);4—性质不明断层(裂);5—背斜构造;6—山峰;7—浅盐湖;8—新类型砂砾岩型卤水钾盐矿重点研究区;9—地名;10—钻孔位置;11— $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素采样位置;12—盐样采样点)^[7]

Fig.1 Location of structure and sampling borehole in Qaidam Basin^[7]

2 样品采集和测试方法

2.1 卤水样品的采集

卤水水化学分析样品和同位素样品采集对象是水文地质钻探施工揭露的砂砾型深层卤水,采样时为了保证卤水样品成分不受污染,在砂砾层上下隔水层中选取止水位置严格止水.卤水样品采集于研究区的大浪滩凹地梁 ZK10(采集化学分析样品、锶和氢氧同位素样品)、黑北凹地黑 ZK04(采集化学分析样品、锶和氢氧同位素样品)、察汗斯拉图凹地察 ZK02(采集化学分析样品、锶和氢氧同位素样品)、昆特依凹地 ZK10(化学分析样品)、马海凹地马 ZK4010(化学分析样品)等多个水文钻孔,将砂砾型深层卤水含水层作为一个独立单元,用潜水泵抽至水槽中采集,每2~4 h采集1个样品.水样瓶在取样前用蒸馏水冲洗干净,取样时再用所取的卤水冲洗至少3次,取样结束后及时将瓶口用胶布缠紧,在瓶身贴上标签,用透明宽胶带粘牢,取样体积为1000 mL.

古盐层化学分析样品和锶同位素样品采集于黑北凹地无名沟.在下干柴沟、上干柴沟和下油砂山组的新鲜面中采集了岩盐化学全分析样品,3组样品采集间距约500 m.古盐层锶同位素样品采集于下干柴沟组和上油砂山组新鲜面,样品间距约1 km(图1).

2.2 样品测试

常、微量元素测定由中国地质科学院盐湖与热水研究发展中心实验室和青海省柴达木综合地质矿产勘查院完成.卤水 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 、 Rb^+ 、 Cs^+ 、 Sr^{2+} 含量采用原子吸收分光光度计法测定, Br^- 的测试采用苯酚红比色法, Cl^- 、 HCO_3^- 、 OH^- 、 CO_3^{2-} (碱度)、 $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ 使用容量法进行分析, SO_4^{2-} 含量采用重量法分析测定,系统误差为1.6%.测试标准及分析方法严格按照DZ0130.1—0130.13—1994《地质矿产实验室测试质量管理规范》和青海省地质局中心实验室编制的《天然卤水及盐类分析方法》进行.固体样品 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Li^+ 、 Rb^+ 、 Cs^+ 、 Sr^{2+} 用电感耦合等离子发射法,采用5110ICP-OES电感耦合等离子发射光谱仪(CS073)测定; Cl^- 的测定采用 AgNO_3 容量法, SO_4^{2-} 的测定采用 BaSO_4 重量法; CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 根据卤水的不同条件采用酸碱滴定法测定; B_2O_3 用 NaOH 容

量法测定;Br⁻、I⁻用 721 分光光度法(比色法)测定;密度用比重瓶法,采用 ME104 电子天平(CS041)测定。

氢(D)、氧(O)同位素测试由北京核工业地质研究院完成。用高纯氦气(99.999%)对 Flash EA 元素分析仪进行冲洗,排除空气,以降低 H₂ 及 CO 本底。当 Flash EA 元素分析仪的炉温升高到 1380℃,本底降到 50 mV 以下时,进行样品测试。卤水在装有玻璃碳的陶瓷管里与过量的 C 发生还原反应,生成供测试用的气体 H₂ 和 CO, H₂ 和 CO 在高纯氦气流的带动下,经过色谱柱分离后分别进入质谱 MAT253 进行分析。测量结果以 SMOW 为标准,记为 δD_{V-SMOW} 和 δ¹⁸O_{V-SMOW},分析精度分别优于±1‰和±0.2‰;氢同位素参考标准为国家标准物质北京大学标准水,其 δD_{V-SMOW} 和 δ¹⁸O_{V-SMOW} 分别为-64.8‰和-8.79‰;兰州标准水的 δD_{V-SMOW} 和 δ¹⁸O_{V-SMOW} 分别为-84.55‰和-12.48‰。

锶同位素组成由南京大学 TIMS VG-354 同位素质谱仪组测试:标样 NBS-987 测得 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 平均值为 0.710250(n=8)。所有的结果归一化到 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.1194。每个样品分析所得误差小于±0.05%,称取样品 150 mg,用去离子水溶解,并离心分离去除不溶物,以排除其它矿物的影响。

硫同位素测试由中国地质科学院矿产资源研究所完成。具体测试时将含有不超过 100 μg 硫的样品和 3 倍于样品的 V₂O₅ 包在一个小锡舟里,自动进样系统每次投入燃烧反应器中一个锡舟,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 W₂O₃、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 S₂O₃ 通过 Cu 丝层时还原为 SO₂。气体通过一根色谱柱(美国热电)将 SO₂ 和其它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,仪器设备为美国热电公司的 253plus、Flash EA 元素分析仪和 Conflo IV 多用途接口。测试过程中采用 IAEA-SO-5、IAEA-SO-6 和 NBS 127 三种国际标准物质作为参考。结果以相对国际标准 V-CDT 的 δ³⁴S_{V-CDT} 值来表示: δ³⁴S_{V-CDT} = [(³⁴S/³²S)_{样品} / (³⁴S/³²S)_{V-CDT-1}] × 1000。基于对标准样品的重复测量,δ³⁴S 的分析精度为 0.1‰。

3 矿床地球化学特征

3.1 矿床常量、微量元素

柴达木盆地西部砂砾型深层卤水 K⁺ 含量为 1.64~3.76 g/L, Na⁺ 含量为 90.65~112.73 g/L, Ca²⁺ 含量为 3.77~6.19 g/L, Mg²⁺ 含量为 2.26~10.82 g/L, Cl⁻ 含量为 169.05~188.27 g/L, SO₄²⁻ 含量为 1.33~2.51 g/L, 矿化度为 276.9~311.4 g/L, 其它离子含量详见表 1。从表 1 还可以看出,微量元素和碳酸根含量低, Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 含量呈负相关。

Piper 图解上,样品落入菱形图解的右边界下部,可知几个凹地水化学性质相似,以氯化钠型为主^[21-22](图 2)。

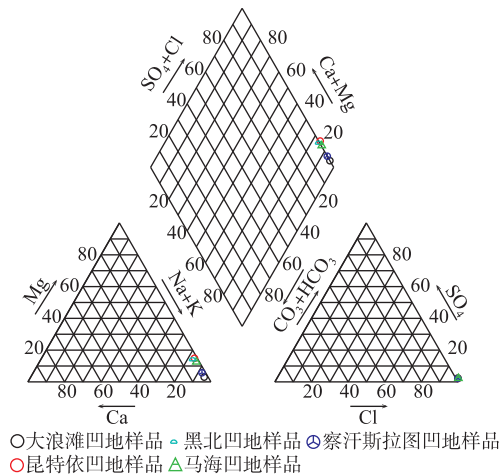


图 2 柴达木盆地砂砾型深层卤水 Piper 图

Fig.2 Piper diagram of sandy gravel brine in Qaidam Basin

表1 柴达木盆地砂砾型深层卤水水化学组分
Tab.1 Chemical composition of gravel brine in Qaidam Basin

采样位置(深度,时代)		样号	K ⁺ / (g/L)	Na ⁺ / (g/L)	Ca ²⁺ / (g/L)	Mg ²⁺ / (g/L)	Cl ⁻ / (g/L)	SO ₄ ²⁻ / (g/L)	B ₂ O ₃ / (g/L)	Li ⁺ / (mg/L)	CO ₃ ²⁻ / (mg/L)
大浪滩凹地	梁 ZK10	B1	2.15	110.52	4.70	2.32	185.98	1.44	89.53	1.54	0.00
	(897.65~1600 m, Q ₁)	B2	1.93	112.77	4.85	2.26	188.27	1.33	96.59	1.51	0.00
黑北凹地	黑 ZK04	B3	3.67	93.43	5.41	9.16	181.33	1.87	121.97	5.37	0.00
	(58.66~1251.3 m, Q ₁)	B4	3.76	93.09	5.45	9.49	181.33	1.62	127.97	5.43	0.00
察汗斯拉图凹地	察 ZK02	B5	1.64	100.58	6.19	3.77	176.31	1.46	188.84	6.68	0.00
	(185~1500 m, Q ₁)	B6	1.67	102.34	5.55	3.67	178.08	1.65	185.82	6.58	0.00
昆特依凹地	ZK10	B7	2.95	91.53	3.79	10.82	176.93	2.12	86.04	2.51	0.00
	(120~440 m, Q ₁)	B8	2.89	90.83	3.77	10.81	177.37	1.98	88.25	2.47	0.00
马海凹地	马 ZK4010	B9	2.95	90.65	3.73	7.84	169.05	2.51	63.98	4.09	0.00
	(170~1400 m, Q ₁)	B10	3.16	92.65	3.81	7.88	172.58	2.44	69.98	4.07	0.00
大浪滩凹地	梁 ZK10	B1	91.71	0.44	<0.100	73.09	51.00	0.53	17.00	1.19	307.10
	(897.65~1600 m, Q ₁)	B2	58.51	0.16	<0.100	78.20	49.00	0.14	18.20	1.19	311.40
黑北凹地	黑 ZK04	B3	2.33	0.01	<0.100	1.74	0.55	0.02	0.13	1.19	295.13
	(58.66~1251.3 m, Q ₁)	B4	0.00	0.01	<0.100	1.58	0.53	0.02	0.13	1.19	295.00
察汗斯拉图凹地	察 ZK02	B5	0.00	0.65	0.42	99.48	40.67	6.05	7.62	1.19	290.82
	(185~1500 m, Q ₁)	B6	0.00	0.66	0.44	96.95	43.17	6.25	7.52	1.19	293.82
昆特依凹地	昆 ZK10	B7	14.37	0.34	<0.100	41.44	35.50	1.36	13.38	1.19	288.23
	(120~440 m, Q ₁)	B8	1.53	0.33	<0.100	40.69	37.00	1.35	12.93	1.19	287.74
马海凹地	马 ZK4010	B9	7.45	0.37	<0.100	50.56	32.50	4.00	4.85	1.18	276.90
	(170~1400 m, Q ₁)	B10	0.00	0.35	<0.100	53.47	34.90	3.70	4.85	1.18	282.69

3.2 矿床特征系数值

从表2可以看出中,钾系数($K \times 10^3 / \Sigma \text{盐}$)为5.65~12.75,钾氯系数($K \times 10^3 / \text{Cl}$)为9.3~20.74,镁氯系数($\text{Mg} \times 10^2 / \text{Cl}$)为1.20~6.12,钠氯系数($\gamma \text{Na} / \gamma \text{Cl}$)为0.79~0.92,溴氯系数($\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$)为0.003~0.274,脱硫系数($r\text{SO}_4 / (r\text{SO}_4 + r\text{Cl})$)为0.01.

3.3 卤水 Sr、S、H、O 同位素

研究区⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值在砂砾型深层卤水中为0.711307~0.711979,在岩盐层中为0.711383~0.711462(表3).

$\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为22.7‰~26.8‰,26个同位素样品的 δD 值变化范围为-58.1‰~-50.4‰, $\delta^{18}\text{O}$ 为-9.8‰~-2.8‰(表4,图3).

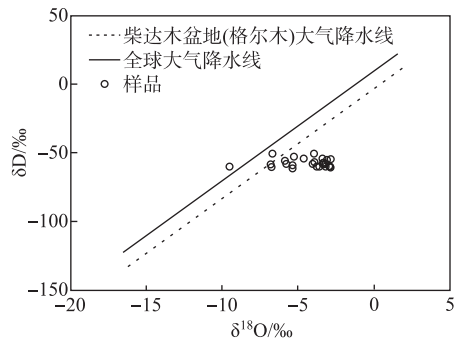


图3 氢/氧同位素分布

Fig.3 Distribution of hydrogen/oxygen isotope

表 2 柴达木盆地砂砾型深层卤水特征系数
Tab.2 Characteristic coefficients of gravel brine in Qaidam Basin

样号	$K \times 10^3 / \Sigma \text{盐}$	$K \times 10^3 / \text{Cl}$	$\text{Mg} \times 10^2 / \text{Cl}$	$\gamma_{\text{Na}} / \gamma_{\text{Cl}}$	$\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$	$r\text{SO}_4 / (r\text{SO}_4 + r\text{Cl})$
B1	6.99	11.56	1.25	0.92	0.274	0.01
B2	6.19	10.25	1.20	0.92	0.260	0.01
B3	12.44	20.24	5.05	0.79	0.003	0.01
B4	12.75	20.74	5.23	0.79	0.003	0.01
B5	5.65	9.3	2.14	0.88	0.231	0.01
B6	5.69	9.38	2.06	0.89	0.242	0.01
B7	10.23	16.67	6.12	0.8	0.201	0.01
B8	10.04	16.29	6.09	0.79	0.209	0.01
B9	10.65	17.45	4.64	0.83	0.192	0.01
B10	11.18	18.31	4.57	0.83	0.202	0.01

表 3 柴达木盆地砂砾型深层卤水 Sr、S 同位素值
Tab.3 Sr and S isotopic values of gravel brine in Qaidam Basin

采样井位及样号	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 误差	$^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\%$	采样井位及样号	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 误差	$^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\%$		
察罕斯拉	BSr1	0.711815	0.000005	24.0	黑北凹地	BSr11	0.711384	0.000008	23.8
图凹地察	BSr2	0.711794	0.000005	26.8	黑 ZK04	BSr12	0.711355	0.000004	24.1
ZK02	BSr3	0.711979	0.000013	23.8	梁中凹地	BSr13	0.711818	0.000007	
	BSr4	0.711846	0.000010	25.7	梁 ZK10	BSr14	0.711807	0.000007	
	BSr5	0.711418	0.000005	25.6		BSr15	0.711806	0.000006	
	BSr6	0.711446	0.000006	25.5		BSr16	0.711854	0.000006	
	BSr7	0.711367	0.000005	25.7		BSr17	0.711762	0.000006	
	BSr8	0.711369	0.000004	25.5	E _{3g}	SSr1	0.711383	0.000006	
黑北凹地	BSr9	0.711307	0.000004	22.7	N _{1y}	SSr2	0.711462	0.000005	
黑 ZK04	BSr10	0.711325	0.000007	23.6					

表 4 柴达木盆地砂砾型深层卤水氢氧同位素分析
Tab.4 Hydrogen/oxygen isotope analysis of gravel brine in Qaidam Basin

采样位置及样品号	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	采样位置及样品号	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$		
大浪滩凹地	BHO1	-50.6	-5.3	黑北凹地	BHO14	-57.7	-2.8
梁 ZK10	BHO2	-51.2	-2.7	黑 ZK04	BHO15	-56.3	-3.0
	BHO3	-52.4	-4.5	察汗斯拉图	BHO16	-55.1	-9.8
	BHO4	-55.3	-8.2	凹地察 ZK02	BHO17	-51.5	-6.8
	BHO5	-55.7	-3.3		BHO18	-51.4	-3.4
	BHO6	-56.3	-3.1		BHO19	-58.1	-2.9
	BHO7	-55.0	-3.1		BHO20	-56.0	-3.7
	BHO8	-54.0	-3.2		BHO21	-50.7	-8.2
	BHO9	-57.7	-6.8		BHO22	-52.7	-4.1
	BHO10	-56.9	-3.9		BHO23	-54.5	-4.0
	BHO11	-56.2	-8.0		BHO24	-50.4	-4.1
	BHO12	-57.3	-5.2		BHO25	-53.1	-2.9
	BHO13	-54.9	-3.3		BHO26	-56.7	-6.0

4 成因分析及找矿方向

阿尔金山山前黑北凹地古近系和新近系古盐层采集的3个样品中, K^+ 含量为 0.062%~0.073%, 平均为 0.069%; Na^+ 含量为 5.53%~9.76%, 平均为 7.13%; Ca^{2+} 含量为 4.08%~8.82%, 平均为 6.41%; Mg^{2+} 含量为 0.1%; Cl^- 含量为 8.01%~14.17%, 平均为 10.26%; SO_4^{2-} 含量为 10.53%~22.30%, 平均为 16.42%; Sr^{2+} 含量为 0.01%~0.02%, NO_3^- 含量为 0.18%~0.78%, 平均为 0.547%, HCO_3^- 含量为 0.04%, 其它离子含量见表 5. 固体盐内主要阳离子溶解度由小至大依次为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ , 主要阴离子溶解度由小至大依次为 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- , 物源成分定量时, 易溶物一般在固体水中高, 难溶物一般在固体盐中高^[20-21]. 固体盐和黑 ZK04II 相含量比较显示, 易溶性 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 平均含量在砂砾型深层卤水中高于盐岩层, 难溶性 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 在岩盐层中高于砂砾型深层卤水(图 4). 从含量变化情况反映出砂砾型深层卤水与古盐层关系密切^[21-24].

表 5 柴达木盆地黑北凹地周缘固体盐和卤水盐类元素平均值对比

Tab.5 Comparison of average values of solid salt and brine salt elements around Heibei depression in Qaidam Basin

样号	$K^+/\%$	$Na^+/\%$	$Ca^{2+}/\%$	$Mg^{2+}/\%$	$Cl^-/\%$	$SO_4^{2-}/\%$	$B_2O_3/\%$	$Li^+/\%$
B1	0.18	9.29	0.39	0.19	15.63	0.12	0.01	1.29×10^{-4}
B2	0.16	9.48	0.41	0.19	15.82	0.11	0.01	1.27×10^{-4}
B3	0.31	7.85	0.45	0.77	15.24	0.16	0.01	4.50×10^{-4}
B4	0.32	7.82	0.46	0.80	15.24	0.14	0.01	4.60×10^{-4}
S1	0.072	9.76	8.82	0.10	14.17	22.30	0.01	0.00
S2	0.062	5.53	4.08	0.10	8.01	10.53	0.01	0.00
S3	0.073	6.10	6.34	0.10	8.59	16.42	0.01	0.00
样号	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Rb^+	Cs^+	Sr^{2+}	Br^-	I^-	NO_3^-
B1	0.00	0.01	3.70×10^{-5}	8.40×10^{-6}	0.01	0.00	4.45×10^{-5}	0.00
B2	0.00	0.00	1.34×10^{-5}	8.4×10^{-6}	0.01	0.00	1.18×10^{-5}	0.00
B3	0.00	0.00	8.41×10^{-7}	0.00	1.5×10^{-4}	4.6×10^{-5}	1.68×10^{-6}	1.09×10^{-5}
B4	0.00	0.00	8.40×10^{-7}	0.00	1.33×10^{-4}	4.45×10^{-5}	1.68×10^{-6}	1.09×10^{-5}
S1	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.68
S2	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.18
S3	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.78

钠氯系数是海水中具有最大稳定性的两对离子比值, 反映了卤水中钠盐的富集程度^[25]. 标准海水的钠氯系数为 0.85, 当地下水溶解地层时, 其值不断增加, 一般大于此值或接近于 1, 但当其溶解钾盐或石盐时, 其值反而降低^[26]. 研究区钠氯系数值为 0.79~0.92, 说明地下水与溶解径流区不同盐度的地层有关. 钾系数和钾氯系数反映卤水的富钾性. 地下水溶滤石盐时钾系数小于 5, 钾氯系数 < 10; 溶滤含钾石盐时钾系数为 5~10, 钾氯系数溶滤为 10~20^[27-29]. 研究区钾系数值为 5.65~12.75, 钾氯系数值为 9.30~20.74, 说明地下水溶解的古盐层中含钾. 镁氯系数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, 只有在溶解光卤石岩和其它含镁硫酸盐型钾盐时, 镁氯系数才有可能大于 0.16^[27]. 研究区镁氯系数为 1.2~6.12, 说明地下水溶滤的古盐层中含较高的硫酸盐, 这与固体盐样分析结果较一致. 海水蒸发浓缩而形成的变质卤水其值大于 3.4, 其值小于 1 时一般为岩盐溶滤型卤水^[26], 研究区溴氯系数为 0.03~0.274, 说明地下水为岩盐溶滤水. 脱硫系数反映地下水所处的封闭程度, 该值越小, 表明封闭程度越好, 还原性条件越好^[26]. 研究区脱硫系数值为 0.01, 和 0 接近, 说明研究区卤水的脱硫作用强, 卤水经历了长期的变质作用, 这与砂砾型深层卤水在相对封闭的砂砾层中长期储存有关^[30-33].

研究区梁中凹地、黑北凹地和察汗斯拉图凹地砂砾型深层卤水钾矿 Sr 同位素 ($^{87}Sr/^{86}Sr$) 数值范围在

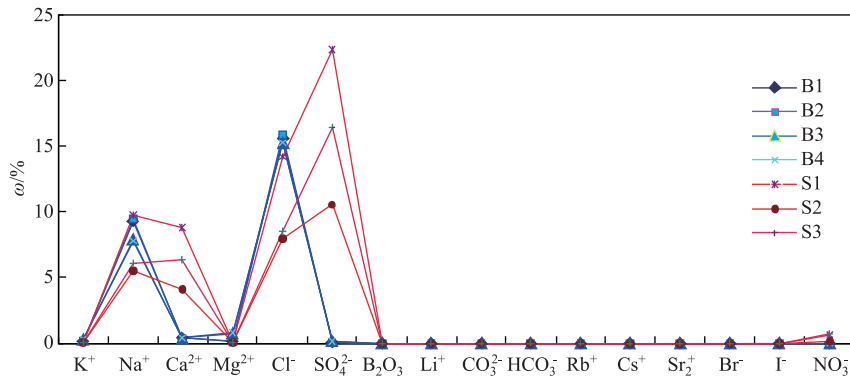


图4 柴达木盆地黑北凹地北缘固体盐和卤水盐类元素对比

Fig.4 Comparison of solid salt and brine salt elements around Heibei depression in Qaidam Basin

0.711307~0.711979 之间,与野外露头古近纪-新近纪石盐 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 数值范围 0.711383~0.711462 接近^[24],说明早更新砂砾型深层卤水与古近纪、新近纪石盐有关. 氢氧同位素值和全球与柴达木盆地大气降水线比较,发生正偏移^[34](图3),这是由于研究区地层中碳酸盐(碳酸钙)岩或岩盐层(硫酸钙)中含氢矿物很少, δD 值较低,而含氧矿物丰富, $\delta^{18}\text{O}$ 值高,当发生水/岩作用时,由于同位素交换对地下水的 δD 值影响不大,但相对 $\delta^{18}\text{O}$ 趋于富集,其结果是使地下水的同位素组成在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图上向右沿水平或近似水平方向飘移(又称“氧-18 飘移”)^[35-39]. 硫酸盐还原细菌的培养和自然状况下硫酸盐还原作用的研究结果表明,细菌硫酸盐还原作用造成的硫同位素范围为 4‰~46‰,平均为 21‰^[40-43],研究区 $\delta^{34}\text{S}$ 范围为 22.7‰~26.8‰,说明其硫同位素分馏中细菌硫酸盐还有作用起了重要因素. 陕北盐盆中奥陶统马五段蒸发岩中石盐段硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 均值为 25.41‰(25.03‰~26.04‰, $n=3$),硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 均值为 25.93‰($n=1$)^[44],南翼山与古近纪以来关系密切的油田卤水中 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 26.46‰^[45-46],由此不难推断,砂砾岩型卤水与古近纪及新近纪地(盐)层有密切关系.

综上所述,研究区靠近山前古盐层中由于溶解度的差异,产生凹地内砂砾型深层卤水成分的不同,从钠氯系数、钾系数、钾氯系数、镁氯系数和溴氯系数共同反映地下水溶解古岩盐层中的盐分后渗流至砂砾层形成砂砾型深层卤水这一事实,脱硫系数反映砂砾型卤水形成于封闭的还原环境;古盐层和砂砾型深层卤水之间的锶同位素、氢氧同位素和硫同位素也证实了砂砾型深层卤水与古盐层之间有渊源关系;总之,从地球化学特征方面,符合从盆地构造及沉积演化历史角度提出的砂砾岩型含钾卤水中钾元素为老含盐地层钾元素溶滤及演化聚集的“承袭”成因模式^[5, 7, 45-47]. 由此可见,盆地中从始新世至上新世干旱条件下不断形成的岩盐层是物源,早更新世砂砾沉积层是成矿空间,周围地下水常年溶滤古近纪以来沉积的岩盐层中的盐类物质,渗流至深部砂砾层,在比较封闭的条件下形成高矿化度卤水,富集成为砂砾型深层卤水钾盐矿(图5).

因此,在下一步勘探工作中,鉴于砂砾岩型含钾卤水为古近纪以来的盐类地层溶滤的“承袭”成因模式,以及山前冲洪积扇为主要储积空间特点,应优先选择古近纪以来盐类地层发育地区的上覆早更新世山前冲洪积扇体且盆地周缘深大断裂发育的地区布署深层砂砾型卤水勘查工作.

5 结论

1) 察汗斯拉图凹地、马海凹地、昆特依凹地、大浪滩凹地、黑北凹地几个凹地早更新世砂砾岩型卤水水化学性质相似,水化学分类属氯化钠型.

2) 砂砾型深层卤水与古近纪-新近纪古盐中的常、微量元素及锶同位素组成关系密切,反映一种渊源关系,结合钻孔施工结果,认为盆地中从始新世至上新世干旱条件下不断形成的山前或下伏岩盐层是物源,早更新世深层砂砾沉积层是成矿空间,周围地下水常年溶滤古近纪以来沉积的岩盐层中的盐类物质,渗流至砂砾层,在比较封闭的条件下形成高矿化度卤水,富集成为砂砾型深层卤水钾盐矿.

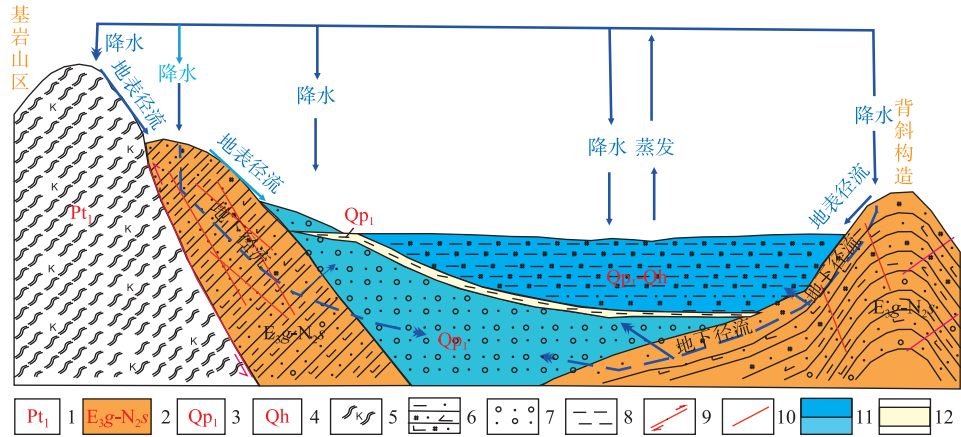


图5 柴达木盆地西部砂砾层含钾卤水成因图解

(1-下元古界;2-渐新统下干柴沟组-上新统狮子沟;3-下更新统;4-全新统;5-钾长片麻岩;6-砂岩、钙质砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩等,具有石膏和石盐层;7-砂砾型深层卤水储层(冲洪积相砂砾石层);7-盐类晶间卤水储层(湖相、盐湖相沉积层);8-隔水层(粘土层或泥岩);9-逆冲断层;10-性质不明断层;11-盐类晶间卤水(深蓝)和砂砾型深层卤水;12-隔水层)

Fig.5 Genetic diagram of potassium bearing brine in sandy gravel layer in Western Qaidam Basin

3) 鉴于柴达木盆地西部砂砾岩型深层卤水成因模式特点,应优先选择山前或下伏古近纪以来盐类地层发育、早更新世山前冲洪积扇体以及深大断裂发育地区布署深层砂砾型卤水勘查工作。

6 参考文献

- [1] Niu XS, Wang AJ, Zheng MP. The consumption rules and demand prediction of potash in China. *China Mining Magazine*, 2019, **28**(10): 6-12. [牛新生, 王安建, 郑绵平. 中国钾盐消费规律与需求预测. 中国矿业, 2019, **28**(10): 6-12.]
- [2] Bao RH, Qi ZY, Zhou DT. Analysis and forecast of supply and demand of potassium salt and potash fertilizer. *Phosphate & Compound Fertilizer*, **28**(2): 1-11. [鲍荣华, 亓昭英, 周大通. 钾盐资源及钾肥供需情况分析 & 预测. 磷肥与复肥, 2013, **28**(2): 1-11.]
- [3] Fan F, Hou XH, Zheng MP *et al.* Preliminary discussion on powerful nation strategy of chemical industry and salt mineral resources in China. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2018, **47**(4): 1-7. [樊馥, 侯献华, 郑绵平等. 我国化工、盐类矿产资源开发利用现状及存在的问题. 盐科学与化工, 2018, **47**(4): 1-7.]
- [4] China Chemical and Mining Association. Analysis of potassium salt supply and demand situation and countermeasures. *Industrial Minerals and Processing*, 2004, **33**(5): 1-2, 23. [中国化学矿业协会. 我国磷矿供需形势分析及对策建议. 化工矿物与加工, 2004, **33**(5): 1-2, 23.]
- [5] Li HP, Zheng MP, Hou XH *et al.* Hydrochemistry characteristics and origin of new brine sandy gravel in early Pleistocene of Heibei concave in Qaidam Basin. *Earth Science*, 2014, **39**(10): 1333-1342. DOI: 10.3799/dqkx.2014.125. [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. 地球科学, 2014, **39**(10): 1333-1342.]
- [6] Li CY, Huang Q, Wang QC *et al.* Analysis of deep brine mineralization conditions in Dalangtan. *Journal of Qinghai Environment*, 2014, **24**(3): 133-136. [李成英, 黄强, 汪青川等. 浅析大浪滩深层卤水成矿条件. 青海环境, 2014, **24**(3): 133-136.]
- [7] Li HP, Zheng MP. Genesis and prospecting direction of deep brine potash deposits since Neogene in western Qaidam Basin. Postdoctoral and mobile station, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 2015: 60-208. [李洪普, 郑绵平. 柴达木盆地西部新近纪以来深层卤水钾盐矿成因与找矿方向. 中国地质科学院矿产资源

- 研究所博士后及流动站, 2015: 60-208.]
- [8] Xiao HL. Genesis of new gravel-tpe potassium-bearing brine in Heibei Depression, Qaidam Basin [Dissertation]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2017: 40-90. [校韩立. 柴达木盆地黑北凹地新型砂砾型含钾卤水成因研究[学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017: 40-90.]
- [9] Liu XX, Yue X, Yu XL *et al.* Characteristics and genesis of the double potash layer metallogenetic model of Kunteyi Depression in the northwest margin of Qaidam Basin. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 246-258. DOI: 10.18307/2020.0123. [刘溪溪, 岳鑫, 于小亮等. 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, 2020, **32**(1): 246-258.]
- [10] Tang LJ, Jin ZJ, Dai JS *et al.* Regional fault systems of Qaidam Basin and adjacent orogenic belts. *Earth Science*, 2002, **27**(6): 676-682. [汤良杰, 金之钧, 戴俊生等. 柴达木盆地及相邻造山带区域断裂系统. 地球科学, 2002, **27**(6): 676-682.]
- [11] Zeng LB, Jin ZJ, Tang LJ *et al.* Structural controls of petroleum and gas distribution on northern margin of Qaidam Basin, China. *Earth Science*, 2001, **26**(1): 54-58. [曾联波, 金之钧, 汤良杰等. 柴达木盆地北缘油气分布的构造控制作用. 地球科学, 2001, **26**(1): 54-58.]
- [12] Dai JS, Cao DY. Evolution characteristics of Cenozoic structural style in the Qaidam Basin. *Geological Review*, 2000, **46**(5): 455-460. DOI: 10.16509/j.georeview.2000.05.003. [戴俊生, 曹代勇. 柴达木盆地新生代构造样式的演化特点. 地质论评, 2000, **46**(5): 455-460.]
- [13] Liu ZH, Wang P, Liu YJ *et al.* Structural features and determination of deformation time in the nanyishan-jiandingshan area of Qaidam Basin. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009, **39**(5): 796-802. [刘志宏, 王芑, 刘永江等. 柴达木盆地南翼山——尖顶山地区构造特征及变形时间的确定. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, **39**(5): 796-802.]
- [14] Zhou JX, Xu FY, Hu Y. Mesozoic and Cenozoic tectonism and its control on hydrocarbon accumulation in the northern Qaidam Basin of China. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, **24**(1): 19-24. [周建勋, 徐凤银, 胡勇. 柴达木盆地北缘中、新生代构造变形及其对油气成藏的控制. 石油学报, 2003, **24**(1): 19-24.]
- [15] Yin A, Dang YQ, Chen XH *et al.* Cenozoic evolution and tectonic reconstruction of the Qaidam Basin: Evidence from seismic profiles. *Journal of Geomechanics*, 2007, **13**(3): 193-211. [尹安, 党玉琪, 陈宣华等. 柴达木盆地新生代演化及其构造重建——基于地震剖面的解释. 地质力学学报, 2007, **13**(3): 193-211.]
- [16] Xu FY, Shi J, Zhang SY *et al.* Evolution of Qaizhong Fault and its effects on the basin formation in Qaidam Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, **30**(6): 803-808. [徐凤银, 施俊, 张少云等. 柴达木盆地柴中断裂带演化及其对成盆作用的控制. 石油学报, 2009, **30**(6): 803-808.]
- [17] Zhang XT, Yang SD, Yang ZJ eds. Research on plate tectonics of Qinghai Province: 1:1 million Tectonic map of Qinghai Province manual. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 1-30. [张雪亭, 杨生德, 杨站君青海省板块构造研究: 1:100万青海省大地构造图说明书. 北京: 地质出版社, 2007: 1-30.]
- [18] Shi LF, Zheng MP, Li JS *et al.* Magnetostratigraphy of Liang ZK05 borehole in Dalangtan, Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 2010, **84**(11): 1631-1640. [施林峰, 郑绵平, 李金锁等. 柴达木盆地大浪滩梁 ZK05 钻孔的磁性地层研究. 地质学报, 2010, **84**(11): 1631-1640.]
- [19] Chen KZ. The general characteristics of salt lakes in China. *Quaternary Sciences*, 1992, **12**(3): 193-202. [陈克造. 中国盐湖的基本特征. 第四纪研究, 1992, **12**(3): 193-202.]
- [20] Zheng MP, Hou XH, Yu CQ *et al.* The leading role of salt formation theory in the breakthrough and important progress in potash deposit prospecting. *Acta Geoscientia Sinica*, 2015, **36**(2): 129-139. DOI: 10.3975/cagsb.2015.02.01. [郑绵平, 侯献华, 于常青等. 成盐理论引领我国找钾取得重要进展. 地球学报, 2015, **36**(2): 129-139.]
- [21] Xie ZH, Liu K, Li ZP *et al.* Analysis of groundwater chemical characteristics based on sediment provenance analysis: A case study of Beijing Plain. *Earth Science Frontiers*, 2010, **17**(6): 81-87. [谢振华, 刘凯, 李志萍等. 基于沉积物物质来源的地下水化学特征分析: 以北京市平原区为例. 地学前缘, 2010, **17**(6): 81-87.]
- [22] Gui HR, Chen LW eds. Hydrogeochemistic evolution and discrimination of groundwater in mining district. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 20-100. [桂和荣, 陈陆望. 矿区地下水水文地球化学演化与识别. 北京: 地质出版社, 2007: 20-100.]
- [23] Ding TP ed. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 1980. [丁悌平. 氢氧同

- 位素地球化学. 北京: 地质出版社, 1980.]
- [24] Yin G, Ni SJ eds. Isotope geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 3-151. [尹观, 倪师军. 同位素地球化学. 北京: 地质出版社, 2009: 3-151.]
- [25] Li TW, Tan HB, Fan QS. Hydrochemical characteristics and origin analysis of the underground brines in west Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2006, **14**(4): 26-32. [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. 盐湖研究, 2006, **14**(4): 26-32.]
- [26] Zhou X, Cao Q, Yin F *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. *Acta Geologica Sinica*, 2015, **89**(11): 1908-1920. [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. 地质学报, 2015, **89**(11): 1908-1920.]
- [27] Yuan JQ ed. Sylvite album- Number one. Beijing: China Industry Press, 1963: 94-99. [袁见齐. 钾盐专辑——第一辑. 北京: 中国工业出版社, 1963: 94-99.]
- [28] Hanor JS ed. Origin and migration of subsurface sedimentary brines. Tulsa: SEPM (Society for Sedimentary Geology), 1987. DOI: 10.2110/scn.87.21.
- [29] Li QK, Fan QS, Wang JP *et al.* Hydrochemistry, distribution and formation of lithium-rich brines in salt lakes on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Minerals*, 2019, **9**(9): 528. DOI: 10.3390/min9090528.
- [30] Herut B, Starinsky A, Katz A *et al.* The role of seawater freezing in the formation of subsurface brines. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, **54**(1): 13-21. DOI: 10.1016/0016-7037(90)90190-V.
- [31] Zheng MP. On saline lakes of China. *Mineral Deposits*, 2001, **20**(2): 181-189, 128. [郑绵平. 论中国盐湖. 矿床地质, 2001, **20**(2): 181-189, 128.]
- [32] Zheng MP. Study advances in saline lake resources on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, **22**(2): 97-102. [郑绵平. 青藏高原盐湖资源研究的新进展. 地球学报, 2001, **22**(2): 97-102.]
- [33] Li HP, Zheng MP, Hou XH *et al.* Control factors and water chemical characteristics of potassium-rich deep brine in Nanyishan structure of western Qaidam Basin. *Acta Geoscientia Sinica*, 2015, **36**(1): 40-49. DOI: 10.3975/cagsb.2015.01.05. [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. 地球学报, 2015, **36**(1): 40-49.]
- [34] Li JS, Ling ZY, Shan FS *et al.* Hydrogen, oxygen and strontium isotopes' indication on origin of lithium-rich salt lakes in eastern Kunlun Mountains. *Wetland Science*, 2019, **17**(4): 391-398. [李建森, 凌智永, 山发寿等. 东昆仑山南、北两侧富锂盐湖成因的氢、氧和锶同位素指示. 湿地科学, 2019, **17**(4): 391-398.]
- [35] Gao JQ, Yu Y, Wang DH *et al.* Composition and spatial distribution characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of surface water in Altay, Xinjiang Province. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, **40**(3): 397-407. [高娟琴, 于扬, 王登红等. 新疆阿勒泰地区地表水体氢氧同位素组成及空间分布特征. 岩矿测试, 2021, **40**(3): 397-407.]
- [36] Habicht KS, Canfield DE, Rethmeier J. Sulfur isotope fractionation during bacterial reduction and disproportionation of thiosulfate and sulfite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, **62**(15): 2585-2595. DOI: 10.1016/S0016-7037(98)00167-7.
- [37] Carpenter AB. Origin and chemical evolution of brines in sedimentary basins. *Oklahoma Geological Survey Circular*, 1978, **79**: 60-77. DOI: 10.2118/7504-ms.
- [38] Land LS, Macpherson GL. Origin of saline formation waters, cenozoic section, gulf of mexico sedimentary basin(1). *AAPG Bulletin*, 1992, **76**(9): 1344-1362. DOI: 10.1306/bdff89e8-1718-11d7-8645000102c1865d.
- [39] Vengosh A, Helvacı C, Karamandereci İH. Geochemical constraints for the origin of thermal waters from western Turkey. *Applied Geochemistry*, 2002, **17**(3): 163-183. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00062-2.
- [40] Canfield DE, Teske A. Late Proterozoic rise in atmospheric oxygen concentration inferred from phylogenetic and sulphur-isotope studies. *Nature*, 1996, **382**(6587): 127-132. DOI: 10.1038/382127a0.
- [41] Canfield DE, Thamdrup B. Fate of elemental sulfur in an intertidal sediment. *FEMS Microbiology Ecology*, 1996, **19**(2): 95-103. DOI: 10.1016/0168-6496(95)00083-6.
- [42] Habicht KS, Canfield DE. Sulfur isotope fractionation during bacterial sulfate reduction in organic-rich sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(24): 5351-5361. DOI: 10.1016/S0016-7037(97)00311-6.
- [43] Wang CL, Liu CL, Xu HM *et al.* 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*, 2013,

- 43(3)**: 691-703. [王春连, 刘成林, 徐海明等. 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, 2013, **43(3)**: 691-703.]
- [44] Zhao HT, Zhang YS, Xing EY *et al.* Sulfur isotopic characteristics of evaporite in the Middle Ordovician Mawu member in the salt basin of northern Shaanxi and its paleoenvironment significance. *Acta Geologica Sinica*, 2018, **92(8)**: 1680-1692. [赵海彤, 张永生, 邢恩袁等. 陕北盐盆中奥陶统马五段蒸发岩硫同位素特征及其古环境意义. 地质学报, 2018, **92(8)**: 1680-1692.]
- [45] Fan Q, Ma HZ, Tan HB *et al.* Geochemistry characteristics of sulfur isotope in oilfield brine of the western Qaidam Basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2009, **28(2)**: 137-142. [樊启顺, 马海州, 谭红兵等. 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, 2009, **28(2)**: 137-142.]
- [46] Zheng MP, Yuan HR, Zhang YS *et al.* Regional distribution and prospects of potash in China. *Acta Geologica Sinica*, 2010, **84(11)**: 1523-1553. [郑绵平, 袁鹤然, 张永生等. 中国钾盐区域分布与找钾远景. 地质学报, 2010, **84(11)**: 1523-1553.]
- [47] Zheng MP, Qi W, Zhang YS. Present situation of potash resources and direction of potash search in China. *Geological Bulletin of China*, 2006, **25(11)**: 1239-1246. [郑绵平, 齐文, 张永生. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析. 地质通报, 2006, **25(11)**: 1239-1246.]