白宝云,许青海,王明祥,等. 察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水水化学特征与形成机制[J]. 盐湖研究,2026,34(1):15-23.
Bai B Y, Xu Q H, Wang M X, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow brine in the Gongnan depression of Chahansilatu Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2026, 34(1): 15-23.
DOI:10.3724/j.yhyj.2025036
CSTR:32273.14.j.yhyj.2025036

察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水水化学特征与形成机制

白宝云[1],许青海[1],王明祥[2,3*],袁 秦[2,3],王利文[1],刘 龙[1],水应东[1],郭 宝[1]

(1. 青海省核工业放射性地质勘查院,青海 西宁 810001; 2. 中国科学院青海盐湖研究所,盐湖资源绿色高值利用重点实验室,青海 西宁 810008; 3. 青海省盐湖地质与环境重点实验室,青海 西宁 810008)

摘 要:钾盐作为我国紧缺战略性非金属矿产,对保障我国粮食安全和社会经济稳定发展具有重要意义。近年来,柴达木盆地含钾卤水资源开发面临部分钾矿资源枯竭及难以满足我国钾资源需求持续增长的挑战,亟须发现新的钾矿资源以满足需求。目前,关于察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水的地球化学特征及其形成机制尚缺乏系统研究,相关数据较为匮乏。研究对察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水中的常量和微量元素含量进行了系统的测试与分析。结果表明:该区浅层卤水的TDS值为277.86~337.45 g/L,指示其经历了显著的蒸发浓缩作用。在主要离子组成方面,拱南凹地浅层卤水中Na^+、Cl^-占主导位置,在Piper图上呈现明显的Na-Cl型区域特征。研究显示,该区域浅层卤水K含量为4.69~9.94 g/L,平均为6.65 g/L,显著高于工业开采品位。B和Li微量元素,其含量分别为29.11~77.21 mg/L(均值45.87 mg/L)和5.08~8.87 mg/L(均值6.63 mg/L),远低于工业开采品位。根据Hardie和Eugster水化学分类原理,拱南凹地浅层卤水的水化学类型为硫酸镁亚型(Cl-SO_4)。研究认为,拱南凹地浅层卤水中的K元素主要来源于阿尔金山系含钾花岗岩的风化,并通过蒸发浓缩富集;B元素主要来源于相对富B的蛇绿岩,而Li元素主要来源于区域基岩的风化剥蚀,其中Li还受到黏土矿物的吸附/解吸及次生矿物共沉淀等多重因素的影响。

关键词:察汗斯拉图盆地;拱南凹地;浅层卤水;水化学特征;浅层卤水形成机制
中图分类号:P619.211 **文献标志码**:A **文章编号**:1008-858X(2026)01-0015-09

钾盐作为我国大宗紧缺战略性“粮食矿产”,在新一轮战略性找矿行动中被列为紧缺非金属矿产[1]。作为农业大国,资源安全和农业发展是我国社会经济稳定发展的基础[2]。根据中国无机盐工业协会统计,2022年中国钾盐(K_2O)产量为574.1万吨(折合KCl约1 024万吨),而2022年的钾盐(K_2O)消费量为1 024.5万吨,同时需进口氯化钾905.2万吨[3]。这表明我国钾盐供需矛盾突出,亟须进一步探索钾盐资源和新型含钾资源的潜力。中国的钾盐资源主要以卤水型钾矿为主[4],察尔汗盐湖、马海盐湖以及罗布泊盐湖等区域是中国主要的含钾卤水赋存地[4-6]。然而,面对我国逐年增长的钾盐需求量和部分盐湖卤水矿储量枯竭的现状,亟须发现新的含钾卤水资源。自1956年以来,对察汗斯拉图盆地进行地质勘察,发现察汗斯拉图盆地内的次级凹陷(主要包括拱南凹地和碱北凹地)赋存有一定储量的相对高钾(K)晶间卤水层,且存在三层分布。然而,关于察汗斯拉图盆地次级凹地卤水的水化学特征及形成机制尚不清晰,相关数据(资源元素:K、B、Li)鲜有报道。因此对察汗斯拉图盆地晶间卤水的研究具有重要意义。

本研究对察汗斯拉图区域拱南凹地的11个钻孔中浅层卤水样品进行了采集,并对浅层卤水样品进行了常-微量元素含量的测试与分析,旨在揭示拱南凹地浅层卤水的水化学特征与成因机制。此外,昆特依、察汗斯拉图、大浪滩等凹陷盆地区域的山前冲-洪积扇发现了新型的砂砾孔隙卤水矿床[7,8]。另外,本研究还为柴达木盆地西部含钾卤水资源的调查和研究提供了重要的数据支撑和科学依据。

收稿日期:2025-04-14;**修回日期**:2025-04-19
基金项目:国家自然科学联合基金重点项目(U21A2018);青海省“昆仑英才高端创新创业”人才计划基金项目
作者简介:白宝云(1976—),男,研究方向:盐湖资源勘查及评价。Email:1006517818@qq.com。
通信作者:王明祥(1983—),男,主要从事盐湖资源勘查及评价研究。Email:wangmx@isl.ac.cn。

1 研究区地质概况

察汗斯拉图盆地位于柴达木盆地西部，与昆特依和大浪滩等区域（图 1a），构成了柴达木盆地西部主要的干盐滩区和含钾卤水储库[5]。察汗斯拉图在地貌上由次级凹陷、中央拱起及山前冲洪积平原构成。其中，碱北凹地和拱南凹地为察汗斯拉图盆地最后的浓缩中心。察汗斯拉图盆地缺乏直接注入的河流，水源补给条件有限，可能主要以阿尔金山系的地下水补给为主，地表广泛被干盐滩覆盖。区域内地层自老到新出露元古界、奥陶系、泥盆系、石炭系、侏罗系、古近系、新近系及第四系。察汗斯拉图盆地第四系地层分布广泛，从下更新统至全新统均有出露，盐类矿产赋存于这些地层中，与下伏的新近系地层呈不整合接触。下更新统（Q_{p1}）分布于东平、碱山、大风山及俄博梁西北侧山前地带，主要岩性为灰褐色砾岩、砂砾岩、粉砂岩及泥质岩夹碎屑岩、石盐、石膏、芒硝等薄层；中更新统（Q_{p2}）分布于阿尔金山山前及第三系构造两侧，主要岩性为黄褐色、黑色含盐类的黏土、淤泥、含石膏粉砂的黏土与含粉砂的石盐互层；上更新统（Q_{p3}）广泛分布于阿尔金山、小赛什腾山山前及各构造洼地间。按成因可分为冰积、洪积、湖积、化学沉积等。主要岩性为湖积含石膏、粉砂的黏土、淤泥，化学沉积含粉砂的石盐等；全新统（Q_h）主要分布于钾湖、北部新盐带、察汗斯拉图等地。按成因可分为化学沉积、风积、冲积、湖沼沉积等，以湖积和化学沉积为主（图 1b）。察汗斯拉图凹陷两侧被俄博梁背斜构造带和红三旱背斜构造带所包围，背斜构造两侧主要由古近纪-新近纪沉积地层组成，岩性以砂岩、含砾砂岩和粉砂岩为主[9]。此外，与察汗斯拉图区域北邻的阿尔金山是重要的构造带，其断裂以走滑断裂为主（图 1a），且断裂组合较为复杂，方向和性质各异。阿尔金山系中岩浆岩分布广泛且规模较大，主要包括花岗岩、闪长岩等[9]。

本次研究的主要区域为拱南凹地，该区域分布化学沉积层和湖积层，其中含石膏和粉砂的石盐层、含石盐和钾石盐的粉细砂层等（图 1b）。这与盆地内年平均降水量仅为 14.5 mm，而蒸发量可达 2 795 mm/a

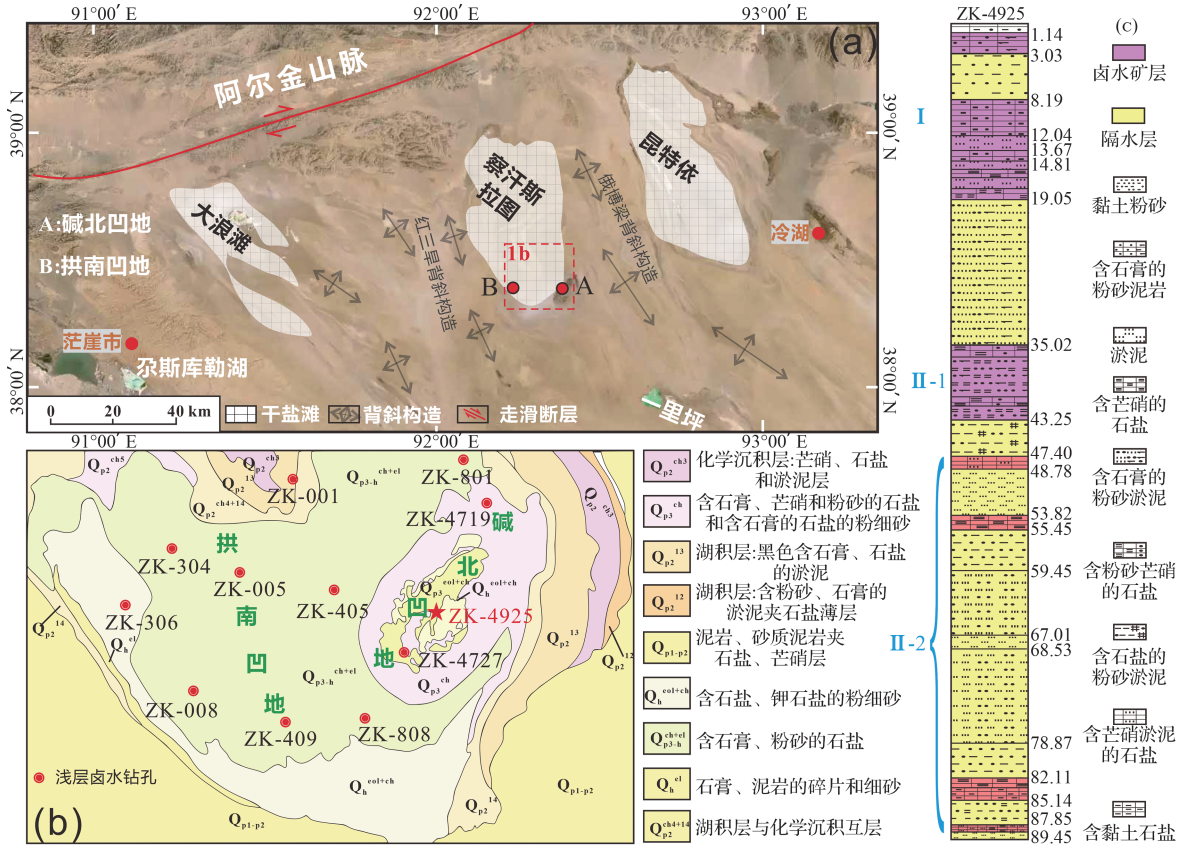


图 1 （a）察汗斯拉图区域位置图；（b）拱南凹地地质图和浅层卤水样品采集点；（c）碱北凹地典型的岩芯剖面图

Fig. 1 （a）Location map of the Chahansilatu region；（b）Geological maps of the Jianbei Basin and collection sites of shallow brine samples；（c）Typical core profile of the Jianbei Depression

的干旱气候条件相对应[10,11]。根据碱北凹地典型钻孔(ZK-4925)的岩芯显示,该区域发育三层卤水层,且卤水分布于含石膏的粉砂泥岩、含芒硝的石盐层、钾石盐以及含黏土的石盐层中。三层卤水层之间存在隔水层,自上而下分别为Ⅰ、Ⅱ-1、Ⅱ-2。Ⅰ含水层包括赋存于上更新统盐层中潜卤水和中更新统上部盐层中的弱承压水。Ⅰ、Ⅱ-1、Ⅱ-2为承压含水层。含卤水层岩性主要为淤泥、含石盐的粉砂淤泥、含石膏的粉砂泥岩及黏土粉砂等。本研究将第二层隔水层以上的卤水层(Ⅰ层)定义为浅层卤水,而隔水层以下的卤水层(Ⅱ-1和Ⅱ-2层)定义为深层卤水。本次研究的主要对象为拱南凹地浅层卤水(Ⅰ层)(图1c)。

2　采样与测试方法

察汗斯拉图盆地拱南凹地和碱北凹地浅层卤水样品采集于11个钻孔,共计获取27件卤水样品。由于钻孔内浅层卤水受隔水层影响呈现两层分布特征,因此采用分层采样法进行样品采集,以确保样品的完整性。样品采集位置的具体深度信息详见表1。样品采样量为500 mL,现场封口后送实验室分析。在实验室中,卤水样品首先经过滤处理以去除杂质。随后,根据不同离子的化学特性,采用相应的分析方法进行测定。卤水样品分析测试了K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}、Li^+、B^{3+}等离子含量等。其中K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、SO_4^{2-}、Li^+、B^{3+}用电感耦合等离子体发射光谱仪测定(ICP-MS),分析精度小于5%;Cl^-用$AgNO_3$容量法;HCO_3^-、CO_3^{2-}采用酸碱滴定法,测试精度小于0.3%。以上各测试项目均在中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心完成。

3　结果与讨论

3.1　察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水水化学特征

察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水样品的常-微量元素含量、pH值、TDS值和水化学类型数据见表1。该区域浅层卤水的pH值范围为7.80~8.10,呈弱

表1　察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水pH值、TDS值及常-微量元素含量

Table 1　The pH values, TDS values and the content of major-trace elements in the shallow brine of Gongnan Depression of Chahansilatu Basin

序号	钻孔编号	采样位置/m	pH值	TDS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Li^+	B^{3+}	水化学类型
				g/L								mg/L		
1	ZK-304	20.0	—	337.45	5.36	110.40	0.30	7.14	187.01	27.05	0.19	5.38	50.50	硫酸镁亚型
2	ZK-801	5.0	7.83	283.14	5.77	89.11	0.46	7.94	174.55	5.16	0.15	5.95	47.80	硫酸镁亚型
3		22.0	7.86	282.41	6.09	88.15	0.63	8.15	171.73	7.64	0.17	5.76	46.00	硫酸镁亚型
4	ZK-4719	2.5	7.81	289.50	9.68	86.98	0.35	12.16	176.43	3.63	0.22	6.02	59.75	硫酸镁亚型
5		3.5	7.81	293.30	9.66	87.90	0.61	12.30	176.43	6.12	0.19	5.95	57.27	硫酸镁亚型
6		6.2	7.82	283.60	9.74	84.53	0.44	12.40	173.61	2.52	0.12	6.22	77.21	硫酸镁亚型
7		10.7	7.80	291.90	9.54	88.07	0.48	12.23	174.55	6.67	0.24	6.02	60.59	硫酸镁亚型
8	ZK-306	6.0	8.08	282.62	4.69	87.01	0.51	5.35	180.18	4.78	0.10	5.08	36.70	硫酸镁亚型
9		16.0	8.01	279.92	4.70	87.32	0.49	5.38	178.30	3.61	0.12	5.11	38.70	硫酸镁亚型
10		26.0	7.87	284.57	4.74	90.12	0.32	5.39	180.18	3.63	0.18	5.17	39.10	硫酸镁亚型
11	ZK-001	18.0	7.93	282.30	9.17	85.39	0.48	10.90	173.61	2.56	0.17	6.75	63.30	硫酸镁亚型
12		25.0	7.96	294.29	9.32	96.73	0.37	10.90	173.61	2.27	0.19	6.02	67.50	硫酸镁亚型
13	ZK-405	15.0	8.06	293.62	6.79	89.06	0.63	14.52	174.55	7.96	0.11	6.85	32.28	硫酸镁亚型
14		25.0	7.98	288.37	6.81	85.19	0.63	14.38	175.49	5.74	0.17	7.00	31.70	硫酸镁亚型
15	ZK-4727	9.1	8.10	292.90	7.38	89.03	0.36	12.60	176.43	6.78	0.15	7.05	65.56	硫酸镁亚型
16		14.9	8.08	290.52	7.66	88.50	0.38	12.89	177.37	3.53	0.19	7.20	63.91	硫酸镁亚型
17	ZK-808	7.0	8.02	288.69	5.51	89.15	0.39	9.95	179.24	4.29	0.16	6.57	31.76	硫酸镁亚型
18		17.0	8.09	284.27	5.43	87.71	0.43	9.72	177.37	3.45	0.16	7.36	29.11	硫酸镁亚型
19		27.0	8.02	278.39	5.25	85.74	0.37	9.35	174.55	2.98	0.15	6.13	32.49	硫酸镁亚型
20	ZK-005	15.0	7.99	280.68	5.49	81.98	0.35	8.63	174.55	4.25	0.19	7.97	40.29	硫酸镁亚型
21		30.0	8.00	304.80	5.45	90.87	0.33	8.44	175.49	18.57	0.22	8.87	42.75	硫酸镁亚型
22	ZK-409	15.0	8.01	286.35	6.48	88.62	0.52	8.08	175.49	6.96	0.20	7.22	31.28	硫酸镁亚型
23		20.0	8.01	283.28	6.01	87.63	0.50	7.85	172.67	8.42	0.20	7.08	31.52	硫酸镁亚型
24		25.0	8.00	277.86	5.64	86.64	0.45	6.78	174.55	3.59	0.21	6.41	29.63	硫酸镁亚型
25	ZK-008	8.0	8.10	285.71	5.44	87.87	0.36	8.32	178.30	5.27	0.15	8.13	45.10	硫酸镁亚型
26		18.0	8.10	289.23	5.99	87.81	0.36	8.39	181.12	5.39	0.17	8.00	43.20	硫酸镁亚型
27		28.0	8.08	289.75	5.82	90.48	0.34	8.34	179.24	5.36	0.17	8.00	43.50	硫酸镁亚型

碱性特征。TDS值范围为277.86～337.45 g/L，平均值为288.86 g/L。与相邻地区相比，拱南凹地浅层卤水的TDS值低于昆特依盆地大盐滩晶间卤水（TDS值：332.29～394.80 g/L）[12,13]，但高于大浪滩梁西盐滩晶间卤水的TDS值（236.35～243.82 g/L）[5]。在K^+含量方面，拱南凹地浅层卤水的K^+含量范围为4.69～9.94 g/L，平均值为6.65 g/L。这一数值远超卤水KCl最低工业开采品位（KCl≥0.5%～1%，K^+≈2.6 g/L）[14,15]。与相邻地区相比，拱南凹地浅层卤水的K^+含量与大浪滩梁西盐滩晶间卤水（K^+含量为4.6～13.1 g/L，平均值为7.98 g/L）[5]相当，但低于昆特依大盐滩的K^+含量（4.57～19.38 g/L，平均值为12.92 g/L）[12,13]。在水化学类型方面，拱南凹地浅层卤水在Piper图上均位于Na-Cl区域（图2），表明其具有高Na^+和Cl^-含量的特征。依据Hardie和Eugster[16]提出的化学划分原理，根据天然水体中存在的主要离子对不同水体的水化学类型进行分类。其分类方法如下：如果母液在方解石矿物沉淀后总碱度呈现（$HCO_3^-+CO_3^{2-}$）>Ca^{2+}，则水体呈Na-K-HCO_3-CO_3-SO_4型（即Na-HCO_3-SO_4型）；如果母液的总碱度在方解石析出后呈现（$HCO_3^-+CO_3^{2-}$）<Ca^{2+}，则地下水的演化路径将分为两个分支，一个是石膏/硬石膏沉淀后表现SO_4^{2-}>Ca^{2+}，地下水演化为Na-K-Mg-Cl-SO_4型（即Cl-SO_4型）；另一个则为残余水体在石膏沉淀后呈现SO_4^{2-}<Ca^{2+}，地下水演化为Na-Ca-K-Mg-Cl型（即Ca-Cl型）[17-20]。拱南凹地浅层卤水在三元Ca-SO_4-HCO_3-alkalinity图中（图3），处于Cl-SO_4区域，即硫酸镁亚型。然而，根据拱南凹地钾矿详查报告[12]，拱南凹地的东北部及西南边缘地带为氯化物过渡亚型。

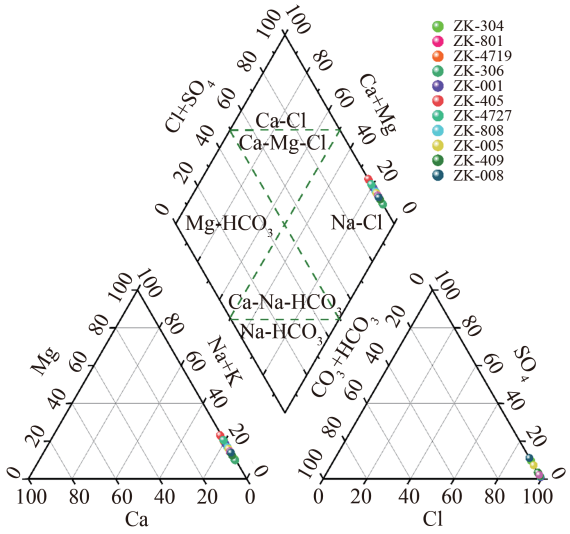


图2 拱南凹地浅层卤水常量离子Piper图

Fig. 2 Piper diagram of major ion in shallow brine in the Gongnan Depression

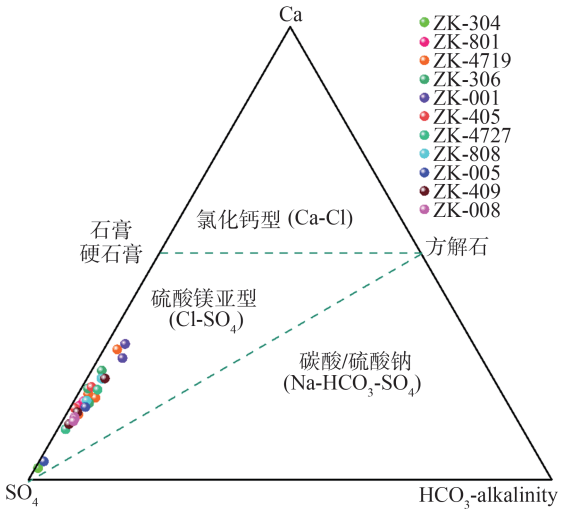


图3 拱南凹地浅层卤水Ca-SO_4-HCO_3-alkalinity三角当量图

Fig. 3 Triangular equivalent diagram of Ca-SO_4-HCO_3-alkalinity of shallow brine in the Gongnan Depression

在微量离子含量方面，拱南凹地浅层卤水中的B和Li含量在不同钻孔样品中变化幅度较小。B含量范围为29.11～77.21 mg/L，平均值为45.87 mg/L；Li含量为5.08～8.87 mg/L，平均值为6.63 mg/L，远低于B含量。B和Li含量均未达到工业开采品位（B_2O_3：1 000 mg/L，B^{3+}：310.5 mg/L；LiCl：150 mg/L，Li^+：49.5 mg/L）[13]。B含量稍高于昆特依大盐滩晶间卤水（14.07～64.17 mg/L，平均值36.91 mg/L）[13]，但远低于大浪滩晶间卤水（321～643 mg/L）[5]。Li含量低于昆特依大盐滩（5.56～31.70 mg/L，平均值13.38 mg/L）和大浪滩晶间卤水（40～56 mg/L）[5,12]。

3.2 察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水成因

研究表明，在干旱区尾闾湖泊或盐湖中，溶质离子的来源主要通过地表径流和地下水流对基岩风化产物进行迁移[5]。这些离子在不同水文地质条件下的流域系统中发生运移与演化，并最终通过河流径流与地下水运移进入湖区。随后，在封闭的凹陷沉积环境中，经历再溶解、蒸发和浓缩作用，导致溶质离子在湖盆或盐湖中实现富集[5,21]。察汗斯拉图盆地拱南凹地作为柴达木盆地西部干旱气候条件下的低洼凹陷区域，没有河流的直接补给，因此该区域的水源可能主要来源于阿尔金山系的地下水，这些地下水在山前下渗后进入拱南凹地。显然，拱南凹地

浅层卤水中的溶质离子(Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^{+}、Cl^{-}、SO_4^{2-}、HCO_3^{-})主要来自山区基岩的风化及地下水流经区域的蒸发盐的淋滤和释放。随后,在干旱气候条件下,拱南凹地中的溶质离子进行演化和富集。这一点在 Gibbs 图(图 4a,b)中 $Na^{+}/(Na^{+}+Ca^{2+})$-TDS 和 $Cl^{-}/(Cl^{-}+HCO_3^{-})$-TDS 的比值上有所体现,拱南凹地的浅层卤水均位于蒸发作用区域,表明拱南凹地浅层卤水的形成主要受控于蒸发浓缩作用。K、B、Li 作为盐湖重要的资源元素,对它们进行来源和富集机制的研究具有重要意义。因此,在探讨拱南凹地浅层卤水的成因时,本文将分别分析卤水样品中 K、B、Li 的主要来源及其富集机制。

3.2.1　察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水 K 的来源和富集机制

柴达木盆地盐湖卤水中钾的主要来源是高钾花岗岩(如钾长花岗岩、正长岩)露头的风化和剥蚀,随后通过河水运载进入湖盆并富集[5]。察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水中的钾也可能主要来源于阿尔金山地区含钾花岗岩的风化和剥蚀。源自阿尔金山的大气降水、冰雪融水及裂隙水在出山口下渗后,以地下水的形式补给拱南凹地浅层卤水,同时可能重溶滤了盆地内含钾蒸发岩(如钾石盐、石盐)中的钾,提供了部分钾源。拱南凹地地层含石盐、钾石盐等盐类矿物为地下水溶滤盐岩释放 K 提供了可能性(图 1c)。此外,察汗斯拉图盆地两侧的背斜构造带中赋存的背斜卤水可能通过上涌溢出补给,为该盆地贡献了一部分钾(图 1a)。然而,考虑到俄博梁和红三旱背斜构造中背斜卤水的钾含量仅为 0.10 ~ 0.20 g/L[12,15,22],与拱南凹地浅层卤水中钾含量相差近两个数量级,这表明背斜构造卤水对钾的贡献可以忽略不计。

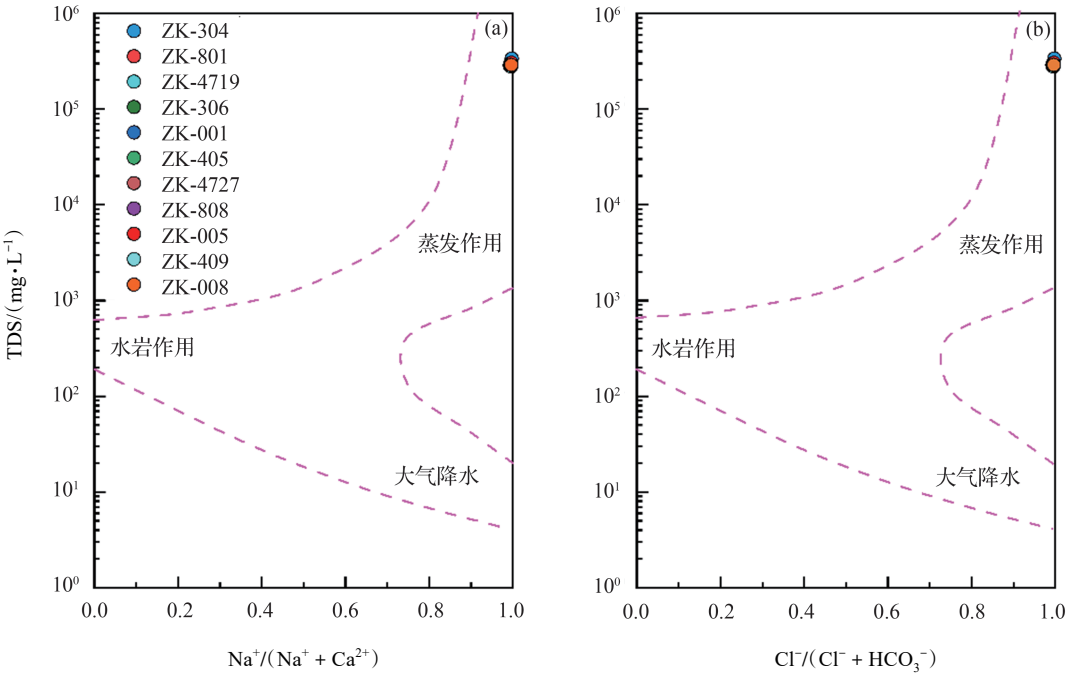


图 4　拱南凹地浅层卤水样品 Gibbs 图

Fig. 4　Gibbs diagram of shallow brines samples in Gongnan Depression

拱南凹地浅层卤水中较高的 K 含量受钾的来源和盐湖中钾的富集与浓缩过程共同控制。在干旱气候条件下,拱南凹地缺乏有效水源补给,蒸发排泄强烈,使得来源于阿尔金山含钾花岗岩风化和剥蚀以及钾石盐等盐类矿物重溶的钾在该区域汇集并富集。在 K-TDS 相关性图中,浅层卤水中 TDS 值与 K 含量呈现显著的正相关性,表明随着 TDS 值的增加,K 含量逐渐上升,这进一步证实了拱南凹地浅层卤水中 K 的富集与卤水的蒸发浓缩作用密切相关(图 5a)。此外,Mg 元素和 K 元素在卤水演化后期易于富集,二者含量的变化特征反映了卤水的演化过程。在 Mg-TDS 相关性图中,二者也呈现显著的相关性,这进一步证实了拱南凹地浅层卤水经历了强烈的蒸发浓缩作用(图 5b)。从昆特依-察汗斯拉图-大浪滩凹陷区域的 K 含量变化来看,盐湖卤水中 K 的富集还受到其他因素的影响。研究表明,在硫酸镁亚型

(Cl-SO_4)盐湖卤水中,若存在高 Ca 水的补给和混合,可能导致盐湖卤水中 K 的异常富集,其 K 含量远高于无 Ca-Cl 水补给和混合的盐湖卤水[12]。昆特依大盐滩晶间卤水的 K 含量高于察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水和大浪滩梁西盐滩晶间卤水,表明昆特依盆地可能存在高 Ca 水的补给。李玉文等[12]的研究证实了高 Ca 水对昆特依盆地晶间卤水的补给作用。尽管在察汗斯拉图盆地拱南凹地的东北部和西南部边缘地带存在氯化物型水化学类型的过渡,表明 Ca-Cl 型背斜构造卤水对拱南凹地边缘地带的浅层卤水有一定影响,但对整个拱南凹地浅层卤水中 K 的富集影响有限。

3.2.2 察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水 B-Li 的来源和富集机制

前人研究表明,青藏高原的温泉是盐湖中硼(B)和锂(Li)等资源元素的主要来源[23,24]。这些温泉中 B 和 Li 的浓度异常高,且对湖盆的补给支持了这一观点。具体而言,位于达肯达坂山的大柴旦热泉和布喀达坂峰的布喀达坂热泉是柴达木盆地 B 和 Li 的主要来源。此外,富 B 的电气石和富 Li 的伟晶岩、火山岩等岩石的风化和剥蚀也为柴达木盆地贡献了部分 B 和 Li[25,26]。因此,热泉水的高 B-Li 通量以及富 B、Li 岩石的风化和剥蚀是控制柴达木盆地 B 和 Li 含量的主要因素。

柴达木盆地西部的昆特依-察汗斯拉图-大浪滩等凹陷盆地的晶间卤水缺乏深部地热流体的影响,

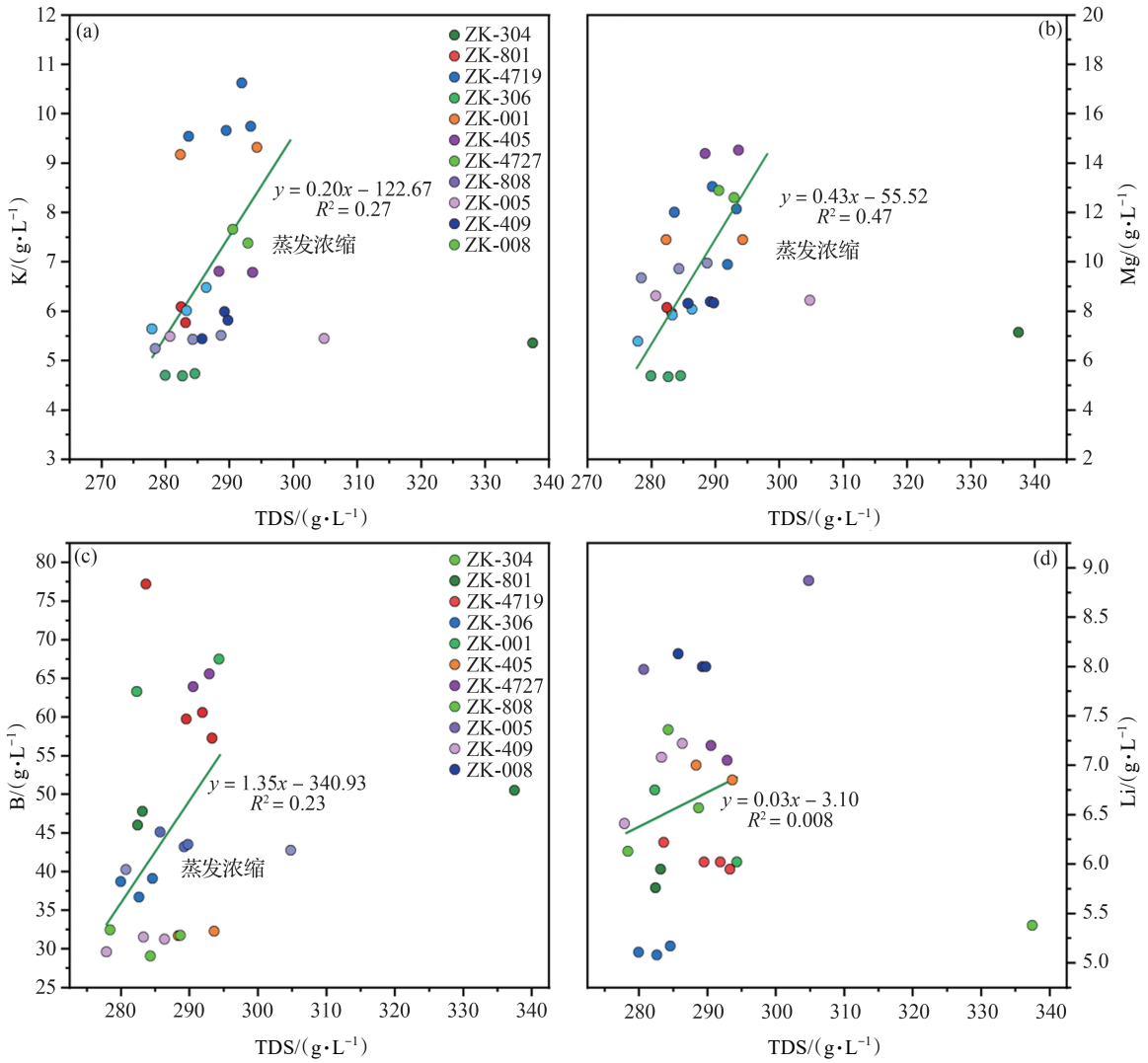


图5 (a) 拱南凹地浅层卤水K-TDS值的相关性图;(b) Mg-TDS的相关性图;(c) B-TDS相关性图;(d) Li-TDS相关性图

Fig. 5 (a) Correlation graph of K-TDS values in shallow brines of Gongnan Depression; (b) Correlation diagram of Mg-TDS; (c) B-TDS correlation chart; (d) Li-TDS correlation graph

其 B 和 Li 元素的含量显著低于受热泉水影响的大柴旦湖水、东-西台吉乃尔湖湖表卤水、一里坪及察尔汗别勒滩区段晶间卤水[27,28]。尽管这些区域的晶间卤水中 B 和 Li 含量较低,尤其是察汗斯拉图盆地拱南凹地的浅层卤水中 B 和 Li 含量较低,但其均值分别为 45.87 mg/L 和 6.63 mg/L,可能主要来源于阿尔金山系基岩的风化[25,26]。B-Li 相关性图和 B/TDS-Li/TDS 相关性图(图 6a,b)显示显著的负相关关系,表明拱南凹地浅层卤水中 B 和 Li 具有不同的来源。李杭等[29,30]的研究表明,阿尔金山系中相对富 B 的蛇绿构造混杂岩带和蛇绿岩分布广泛,而含 Li 的伟晶岩脉分布稀少且远离察汗斯拉图盆地拱南凹地。这表明拱南凹地浅层卤水中的 B 可能主要来源于阿尔金山系中富 B 蛇绿岩的风化和剥蚀作用,而 Li 可能主要来源于阿尔金山系基岩的风化和剥蚀作用。基于此,大浪滩晶间卤水的 B 和 Li 含量高于察汗斯拉图盆地拱南凹地,这可能源于相对富 B 蛇绿岩和富 Li 伟晶岩等高 B 和 Li 岩石的风化和剥蚀[25,26]。相比之下,昆特依盆地中的晶间卤水的 B 和 Li 主要来源于阿尔金山系基岩的风化和剥蚀。

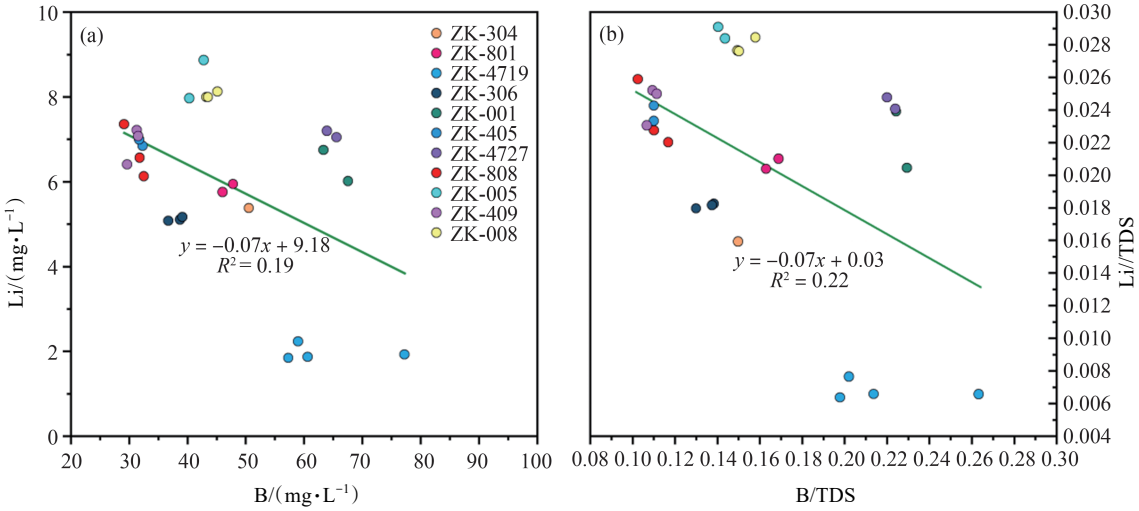


图 6　(a) 拱南凹地浅层卤水 B-Li 相关性图;(b) B/TDS-Li/TDS 比值相关性图

Fig. 6　(a) B-Li correlation diagram of shallow brine in the Gongnan Depression; (b) B/ TDS-LI /TDS ratio correlation diagram

察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水中的 B 和 Li 主要来源于阿尔金山系基岩的风化和剥蚀,但其富集过程受到干旱气候条件下蒸发浓缩作用的控制。B-TDS 值和 Li-TDS 值的相关性图呈现出一定的相关性特征,指示浅层卤水中 B 和 Li 的富集可能受到蒸发作用的影响(图 5c,d)。然而,Li-TDS 值的相关性图显示的 R^2 值(−0.008)表明显著的离散性特征,这暗示拱南凹地浅层卤水中的 Li 可能受到其他因素的显著影响(图 5d)。在 B-TDS 相关性图中,B 含量的变化主要集中在 TDS 值为 280 ~ 310 mg/L 的区间内,说明浅层卤水具有较高的蒸发程度但 B 含量变化不大,这表明阿尔金山基岩的风化和剥蚀仅能提供有限的 B 来源(图 5c)。而在 Li-TDS 相关性图中,Li 含量在不同 TDS 值区间内表现出变化,且整体含量较低,这可能暗示拱南凹地浅层卤水中 Li 的富集还受到黏土矿物吸附/解吸以及次生矿物共沉淀等过程的影响(图 5d)。

4　结　论

通过对察汗斯拉图盆地拱南凹地浅层卤水的常、微量离子含量进行测试分析,并对比察汗斯拉图盆地拱南凹地、昆特依大盐滩及大浪滩等区域晶间卤水中 K、B、Li 等元素的含量差异,对拱南凹地浅层卤水的水化学特征及其 K、B、Li 等元素的来源和富集机制进行了分析,得出以下结论。

(1) 拱南凹地浅层卤水中 K 的含量范围为 4.69 ~ 9.94 g/L,平均值为 6.65 g/L,远高于卤水 KCl 的工业开采品位(KCl ≥ 0.5% ~ 1%,K^+ ≈ 2.6 g/L)。然而,B 和 Li 的含量分别为 29.11 ~ 77.21 mg/L(平均值为 45.87 mg/L)和 5.08 ~ 8.87 mg/L(平均值为 6.63 mg/L),均远低于 B-Li 卤水的最低工业开采品位(B_2O_3: 1 000 mg/L, B^{3+}: 310.5 mg/L; LiCl: 150 mg/L, Li^+: 49.5 mg/L)。根据 Hardie 和 Eugster 提出的化学划分原理,拱南凹地浅层卤水的水化学类型被归类为硫

酸镁亚型(Cl-SO_4)。

(2) 拱南凹地浅层卤水的形成主要受控于干旱气候条件下的蒸发浓缩作用。

(3) 拱南凹地浅层卤水中的K主要来源于阿尔金山地区含钾花岗岩的风化和剥蚀;B元素主要来源于相对富B的阿尔金山系蛇绿岩,而Li的来源则主要受控于阿尔金山系基岩的风化和剥蚀。

(4) 蒸发浓缩作用是拱南凹地浅层卤水中K、B、Li元素汇聚和富集的关键因素。此外,黏土矿物的吸附/解吸作用以及次生矿物的共沉淀过程对浅层卤水中Li含量的变化具有重要影响。

参考文献

[1] 王立成,吴驰华,张华,等. 青藏高原周缘中-新生代钾盐矿床研究进展、问题及展望[J]. 岩石学报,2025,41(3):1014-1042.

[2] 张永生,邢恩袁,郑绵平,等. 川东北宣汉地区海相"新型杂卤石钾盐矿"的发现、突破与前景[J]. 地质学报,2024,98(10):2823-2846.

[3] 张艳松. 中国钾盐资源安全态势与全球治理研究[D]. 武汉:中国地质大学,2023.

[4] 郑绵平,袁鹤然,张永生,等. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报,2010,84(11):1523-1553.

[5] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京:科学出版社,1987.

[6] 曹文虎,吴婵. 卤水资源及其综合利用技术[M]. 北京:地质出版社,2004.

[7] 李洪普,侯献华,郑绵平,等. 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[J]. 湖泊科学,2022,34(3):1043-1054.

[8] 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[J]. 地球学报,2015,36(2):129-139.

[9] 山发寿,王明祥,王利文,等. 青海省冷湖镇察汗斯拉图Ⅲ矿区钾、锂资源勘查验证工程报告[R],青海省核工业放射性地质勘查院,2022.

[10] WANG J Y, FANG X M, APPEL E, *et al*. Magnetostratigraphic and radiometric constraints on salt formation in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 78: 53-64.

[11] 陈安东,顾佳妮,王学锋,等. 晚第四纪柴达木盆地盐湖成盐期与冰期对比方案的再认识[J]. 矿床地质,2022,41(2):426-439.

[12] 李玉文,李建森,樊启顺,等. 柴达木盆地大盐滩矿区深层晶间卤水的成因[J]. 盐湖研究,2019,27(1):82-88.

[13] REN Q H, LI B K, ZHANG Y, et al. Origin and evolution of intercrystalline brine in the northern Qaidam Basin based on hydrochemistry and stable isotopes[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: 1106181.

[14] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0212—2002 盐湖和盐类矿产地质勘查规范[S]. 中华人民共和国国土资源部,2003.

[15] 李建森. 柴达木盆地卤水型K、B、Li资源富集和成矿机制[D]. 合肥:中国科学技术大学,2022.

[16] HARDIE L A, EUGSTER H P, The evolution of closed-basin brines. In: Morgan, B.A. (Ed.), Fiftieth Anniversary Symposia: Mineralogy and Petrology of the Upper Mantle, Sulfides[J]. Mineralogy and Geochemistry of Non-Marine Evaporites, 1970, 3: 273-290.

[17] LOWENSTEIN T K, JAGNIECKI E A, CARROLL A R, *et al*. The Green River salt mystery: What was the source of the hyperalkaline lake water? [J]. Earth-Science Reviews. 2017, 173: 295-306.

[18] FAN Q S, LOWENSTEIN T K, WEI H C, *et al*. Sr isotope and major ion compositional evidence for formation of Qarhan Salt Lake, western China[J]. Chemical Geology, 2018, 497, 128-145.

[19] MIAO W L, ZHANG X Y, LI Y L, *et al*. Lithium and strontium isotopic systematics in the Nalenggele River catchment of Qaidam basin, China: Quantifying contributions to lithium brines and deciphering lithium behavior in hydrological processes[J]. Journal of Hydrology, 2022, 614, Part B: 128630.

[20] SONG H L, FAN Q S, LI Q K, *et al*.Ca-high water recharge and mixing constrain on evolution and K enrichment of brine deposits in the evaporite basin: Case and analogue study in the Qaidam Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2024, 632: 130883.

[21] 袁见齐,杨谦,孙大鹏,等. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件[M]. 北京:科学出版社,1995.

[22] 樊启顺,马海州,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,(4):6-12.

[23] 郑喜玉. 西藏盐湖[M]. 北京:科学出版社,1988.

[24] 郑绵平. 青藏高原盐湖[M]. 北京:科学出版社,1989.

[25] HAN J B, JIANG H J, LIU J B *et al*. Sources analysis of lithium deposit in deposit in Dong-Xi Taijinaier Salt Lake of Qaidam Basin, Qing-Tibet Plateau[J]. Journal of Earth Science, 2023, 34: 1083-1094.

[26] HAN C M, FAN Q S, XIAO Y, *et al*. B-Li differential enrichment of geothermal systems in the Da Qaidam and Gonghe-Guide Basin, northeastern Tibetan Plateau: Evidence from water chemistry and H-O-B-Li isotopes[J]. Science of The Total Environment, 2024, 955: 176868.

[27] SHI Z W, TAN H B, XUE F, *et al*. Hydrochemical evolution and source mechanisms governing the unusual lithium and boron enrichment in salt lakes of northern Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 2024, 136: 5174-5190.

[28] XUE F, TAN H B, ZHANG X Y, *et al*. Sources, enrichment mechanisms, and resource effects of rare metal elements-enriched geothermal springs in Xizang[J]. Science China Earth Sciences, 2024, 67: 3476-3499.

[29] 李杭,洪涛,杨智全,等. 稀有金属花岗伟晶岩锆石、锡石与铌钽铁矿U-Pb和白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$测年对比研究——以阿尔金中段吐格曼北锂铍矿床为例[J]. 岩石学报,2020,36(9):2869-2892.

[30] 李杭,洪涛,杨智全,等. 阿尔金中段吐格曼北花岗伟晶岩型锂铍矿床多阶段岩浆-成矿作用[J]. 岩石学报,2022,38(10):3085-3103.

Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Brine in the Gongnan Depression of Chahansilatu Basin

BAI Baoyun[1], XU Qinghai[1], WANG Mingxiang[2,3*], YUAN Qin[2,3], WANG Liwen[1], LIU Long[1], SHUI Yingdong[1], GUO Bao[1]

(1. *Qinghai Institute of Nuclear Industry Radiological Geological Prospecting*, *Xining*, 810001, *China*; 2. *Key Laboratory of Green and High-end Utilization of Salt Lake Resources*, *Qinghai Institute of Salt Lakes*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xining*, 810008, *China*; 3. *Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes*, *Xining*, 810008, *China*)

Abstract: Potassium salt, a critically short strategic non-metallic mineral in China, plays a pivotal role in safeguarding food security and fostering the stable growth of society and the economy. The development of potassium brine resources in the Qaidam Basin confronts challenges including the partial depletion of potassium reserves and the challenge of keeping pace with the escalating demand for potassium within the country. The identification of new potassium resources is therefore critical to meet this demand. Current research is lacking in systematic analysis of the geochemical attributes and formation processes of the shallow brine within the Gongnan Depression of the Chahansilatu Basin, with limited data available. This study conducted a comprehensive analysis of the major and trace elements present in the shallow brine of the Gongnan Depression. Findings revealed that the total dissolved solids (TDS) concentration in the shallow brine ranges from 277.86 to 337.45 g/L, indicative of substantial evaporation and subsequent concentration. The shallow brine is characterized by a preponderance of Na^+ and Cl^-, which exhibits a distinct Na-Cl type regionality on the Piper diagram. The potassium content in the shallow brine spans from 4.69 to 9.94 g/L, with an average of 6.65 g/L, considerably exceeding the standard industrial mining grade. In contrast, the trace elements boron and lithium are present at concentrations of 29.11 to 77.21 mg/L (mean: 45.87 mg/L) and 5.08 to 8.87 mg/L (mean: 6.63 mg/L), respectively, well below the industrial mining threshold. The hydrochemical classification of the shallow brine in the Gongnan Depression, following the Hardie and Eugster system, is classified as the magnesium sulfate subtype (Cl-SO_4). The study suggests that the potassium in the shallow brine is primarily sourced from the weathering of potassium-rich granite within the Altyn Tagh Mountains, with enrichment through evaporation and concentration. Boron is primarily derived from serpentinites relatively enriched in boron, while lithium is primarily derived from the weathering and erosion of regional bedrock. Additionally, lithium is influenced by multiple factors, including adsorption/desorption by clay minerals and co-precipitation with secondary minerals.

Key words: Chahansilatu Basin; Gongnan Depression; Shallow brines; Hydrochemical characteristics; Shallow brine origin