

柴达木盆地尕斯库勒盐湖区成盐物质的来源与水力迁移作用*

韩积斌^{1,2}, 许建新², 王国强², 何天丽²

(1: 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

(2: 中国科学院西北生态环境与资源研究院, 中国科学院青海盐湖研究所, 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810008)

摘要: 水动力条件是盐湖成盐成矿的必要条件之一。利用研究区各类水体的理化参数(pH、氧化还原电位、电导率和总溶解性固体)、水化学特征、元素比值等参数识别尕斯库勒盐湖成盐元素的来源及水力迁移作用。结果表明: 尕斯库勒盐湖成盐元素主要来源于蚀源区岩石风化, 其中冰川融水、硅酸盐风化、碳酸盐风化和蒸发盐风化分别占 0.04%、0.15%、63.89% 和 35.92%, 在祁漫塔格山前一带, 受到深部补给作用。高山区到平原区, 水动力条件总体上逐渐降低; 而在垂向上随着深度的增大含水层 I~II 之间水动力条件逐渐减弱, 含水层 III~V 之间水动力条件变充足。河流与溢出带水体之间存在局部水流系统, 与平原区含水层之间存在区域水流系统。水动力条件和水力联系对元素的迁移和富集具有明显的相关性, 二者控制着元素的迁移速度以及元素在空间上的富集规律并影响着水化学类型。

关键词: 物质来源; 水动力条件; 水力联系; 尕斯库勒盐湖

The material sources and it's hydraulic migration in the Gas Hure salt lake, Qaidam Basin, China

HAN Jibin^{1,2}, XU Jianxin², WANG Guoqiang² & HE Tianli²

(1: *School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of Qinghai Province, Qinghai Institute of Salt Lakes, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, P.R.China*)

Abstract: Hydrodynamic is one of the most important conditions during the process of salt metallogenic. This study utilized the parameters such as pH, oxidation-reduction potential, electric conductivity, total dissolved solid, hydrochemical characters, elements rate to identify the material source and hydraulic migration in the Gas Hure salt lake. The result revealed that material source is due to rock weathering of erosion area, with the contribution of glacier melt water, silicate weathering, carbonate weathering and evaporation salt weathering as 0.04%, 0.15%, 63.89% and 35.92%, respectively. The piedmont of Qiman Tage mountain is recharged from deep aquifer. From the mountain to the plains the hydrodynamic is gradually decreased; for the hydrodynamic in vertical profile, from the aquifer I to aquifer II it is decreased, while increased from the aquifer III to aquifer V. The river water and overflow water has local water exchange and both of them have regional flow system. Hydrodynamic condition and hydraulic connection has obvious correlation to the migration and enrichment of elements and controls the speed and the migration of elements enrichment regularity of elements in space, and even affects the hydrochemical types.

Keywords: Material source; hydrodynamic; hydraulic connection; Gas Hure salt lake

尕斯库勒盐湖位于柴达木盆地西北缘, 盐湖内富含芒硝、钾盐和铀等重要的矿产资源。通常认为干旱的气候条件、封闭半封闭的古湖盆地以及充足的水源补给是盐湖形成的必要条件^[1]。长期以来, 学者们从地球化学^[2-5]或古气候特征^[6-8]来研究成盐物质的来源以及气候条件对盐类矿物分布的影响。然而, 水力作用对成盐元素的迁移研究还十分薄弱。淋滤实验表明, 在弱酸性、常温常压下, K⁺迁出岩石中的量为 0.20%^[2]。资

* 青海省自然科学基金项目(2014-ZJ-703)资助。2016-10-09 收稿; 2017-01-17 收修改稿。韩积斌(1985~), 男, 博士研究生, 助理研究员; E-mail: hanjibinali@163.com.

料表明,晚更新世晚期尕斯库勒盐湖地形特征基本与现代盐湖相似,在大约 10 万年间尕斯库勒盐湖接受河流补给的盐分超过盐湖地层中 KCl 的储量^[3]. 可见水体对成盐元素的迁移富集具有重要作用.

因此,本文在查明尕斯库勒盐湖成盐元素物质来源的基础上,重点研究水力作用下成盐元素在研究区空间上的分布规律,对深刻认识成盐元素在空间上的循环规律具有重要的意义.

1 研究区水文地质概况

本文选择河流源头至尕斯库勒湖一个完整的地下水流域进行研究(37°35′~38°19′N,87°58′~91°07′E;图 1). 盐湖北部为阿尔金山系的阿哈堤山,平均海拔 4790 m;东北部为油砂山,平均海拔 3500 m;南部为昆仑山系的祁漫塔格山,海拔约为 4500 m,盐湖位于盆地中央低洼地带,海拔约为 2860 m,是各类水体的排泄区. 研究区内褶皱构造和断裂构造普遍发育,其构造形迹在盐湖西北、东北部表现最为明显,断层大多为逆断层(图 1). 盐湖及周边区的地层从震旦系到第四系都有出露^[9-11](图 1). 震旦系地层主要分布于阿尔金山山前,岩性以绿泥片岩、石英片岩、大理岩和千枚岩为主. 下古生界在阿尔金山和祁漫塔格均有出露,以硅质岩、安山岩、石英和大理岩为主. 泥盆系出露在茫崖石棉矿一带,以安山岩和灰黑色砂岩为主. 石炭系出露在盐湖南部的祁漫塔格北坡,以砂岩、页岩和石灰岩为主. 三叠系在祁漫塔格地区发育,以页岩和酸性火山岩为主. 而侏罗系广泛分布在阿尔金山前,以页岩、酸性火山岩为主. 白垩系分布于阿尔金山与油砂山之间,以砂岩为主,而在祁漫塔格缺失;古近系分布于盐湖的狮子沟—干柴沟之间,以泥岩、石膏、芒硝和岩盐为主. 新近系分布于盐湖北部的阿尔金山及油砂山一带,以泥岩夹石膏层为主;第四系发育广泛,分布于河床及湖盆附近,含粉砂岩、泥岩夹岩盐、芒硝和石膏.

盐湖补给源主要为大气降水补给、地表水渗漏补给、含水层越流补给^[9]. 平原区年均降水量 55.34 mm,年蒸发量高达 2856.93 mm,大气降水补给量较小. 地表水补给源主要是库拉木勒克萨伊河(KLMH)和阿特阿特坎河(ATKH),KLMH 发源于阿尔金山南缘古尔盆山口,ATKH 发源于祁漫塔格山,两河在高山区以地表径流为主,而在两河流域的不远处河流转入地下补给地下水,是地下水最主要的补给来源,其渗漏量为 $2.93 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[9],随着径流条件的改变和含水介质的变细,地下水由单一潜水渐变为潜水与承压水的双层水或多层水,承压水通过越流补给盐湖^[12],在出山口以泉的形式出露地表形成泉集河(ALEH)最终排泄至尕斯库勒盐湖.

2 采样及分析方法

分别在 2010 年 5—6 月和 2015 年 5—6 月进行采样,从高山区到平原区采集 66 件样品,其中高山区:库拉木拉克萨伊河水样(KLMH)10 件,阿提阿特坎河水样(ATKH)4 件;溢流区:阿拉尔河水(ALEH)3 件,泉水样(GQ)13 件,溪水样(GX)6 件,民用井水样(GJ)4 件;平原区:盐湖卤水样(GH)10 件,晶间卤水样(GJJ)11 件,钻孔水(ZK06)5 件,采样点分布如图 1 所示. 其中 ZK06 为完整井,钻孔深度达 102.69 m,分别在 3.67、19.70、31.70、55.50 和 61.00 m 深度处取样,其剖面如图 1 所示.

野外采样过程中利用多参数水质分析仪(YSI)现场获取水体的 pH、氧化还原电位(Eh)、总溶解固体(TDS)和电导率(EC)等参数. 室内分析测定水体中的常量元素,所有水样的分析均在中国科学院青海盐湖研究所分析测试部进行. 其中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度测定采用常规重量法(误差 0.5%)和滴定法(误差 0.2%~0.3%),测试结果见表 1.

3 结果与讨论

3.1 结果

3.1.1 阿拉尔河流域水化学特征及其类型 高山区(region 1)阳离子以 Na^+ 为主(约 25%~90%), Ca^{2+} 次之(约为 25%)(除 KLMH15-4、KLMH15-5、KLMH15-6、KLMH15-7、KLMH15-8),阴离子以 SO_4^{2-} (约 20%~70%)和 HCO_3^- (约 20%~50%,除 KLMH15-1 至 KLMH15-8、ATKH15-1、ATKH15-2 以及泉水样 GQ15-11)为主,属 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Na}$ 或 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水;溢出带区(region 2)阳离子以 Na^+ (约 30%~50%,除 GQ15-4)和 Ca^{2+} (约 30%~50%,除 GJ15-2)为主,阴离子 HCO_3^- 约为 20%~50%, Cl^- 占 22%~50%,水体类型属 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型;在盐湖沉

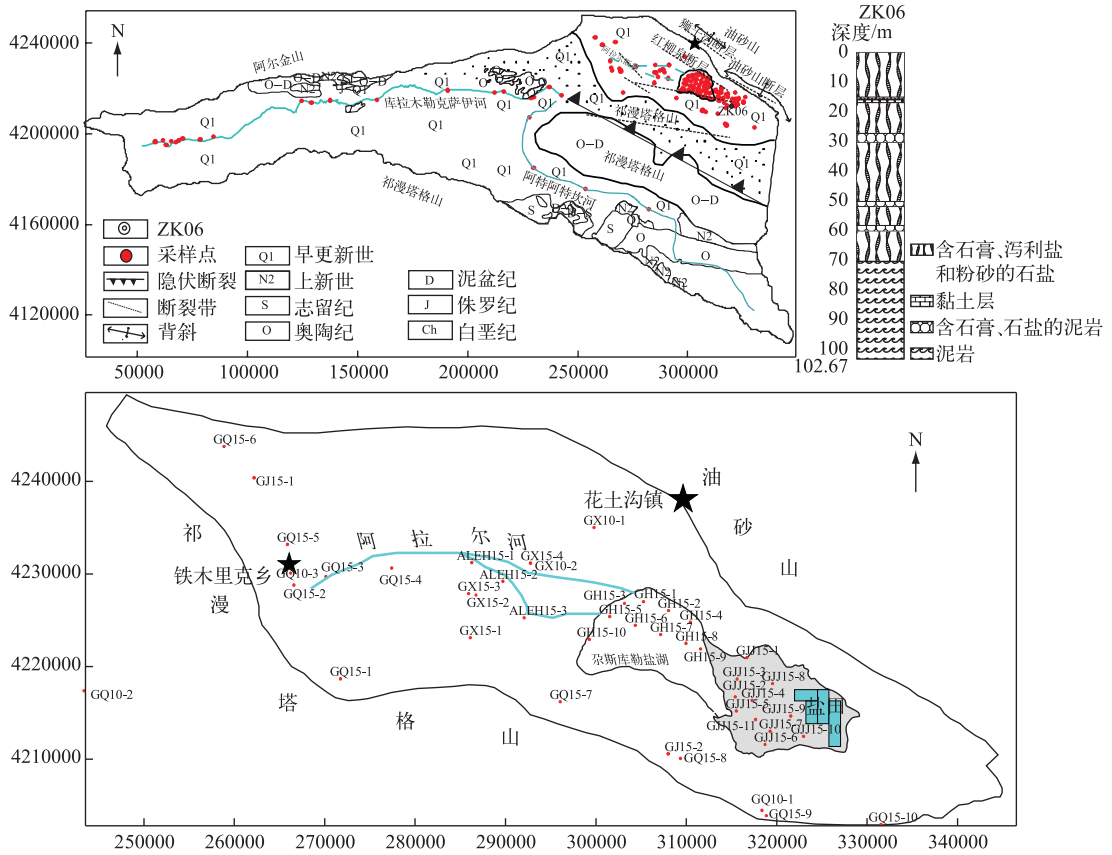


图 1 研究区采样点分布 (修改自文献[13-14])

Fig.1 Distribution of sampling spots of the Gas Hure salt lake

表 1 尕斯库勒盐湖区不同水体的理化参数及常量元素浓度

Tab.1 Statistical data of the chemical compositions and EC, pH, Eh, TDS in different regions of the Gas Hure salt lake, Qaidam Basin

采样位置	pH		Eh/mV		EC/(mS/cm)		TDS/(g/L)		CO ₃ ²⁻ /(mg/L)		HCO ₃ ⁻ /(g/L)	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
溢流区	7.75~8.86	8.24	-113.00~237.67	104.94	0.30~55.30	5.79	0.24~45.06	4.36	0~57.56	2.96	0.07~0.99	0.31
高山区	8.01~8.93	8.29	232.00~274.00	256.58	0.36~1.82	0.84	0.33~1.05	0.50	0	0	0.09~0.37	0.15
平原区	6.20~7.81	7.35	152.00~242.00	174.71	68.09~213.26	151.90	126.38~397.61	298.93	0	0	0.14~0.97	0.58

采样位置	SO ₄ ²⁻ /(g/L)		Cl ⁻ /(g/L)		Ca ²⁺ /(g/L)		Mg ²⁺ /(g/L)		Na ⁺ /(g/L)		K ⁺ /(mg/L)	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
溢流区	0.04~5.56	0.94	0.03~24.9	1.64	0.02~1.64	0.17	0.01~1.61	0.18	0.03~12.85	1.07	0.34~250.50	37.11
高山区	0.05~0.22	0.10	0.06~0.18	0.11	0.03~0.09	0.05	0~0.05	0.02	0.01~0.14	0.07	2.65~11.28	4.51
平原区	1.11~82.32	45.47	71.33~252.77	153.10	0.30~6.82	1.56	6.85~84.81	27.47	1.49~106.98	63.37	483.68~26751.32	7371.97

积平原区(region 3)阳离子以 Mg²⁺ 和 Na⁺ 为主,变化范围分别为 20%~95%、0%~80%,阴离子以 Cl⁻ 占绝对优势,约 70%~100%,水化学类型为 Cl-Na·Mg 型(图 2)。

总体上,从高山区—平原区,水化学特征从淡水逐渐过渡到咸水,在盐湖沉积平原区强烈的蒸发作用下演化为卤水;水体类型以碳酸盐型水逐渐过渡到氯化钠或氯化镁型水。

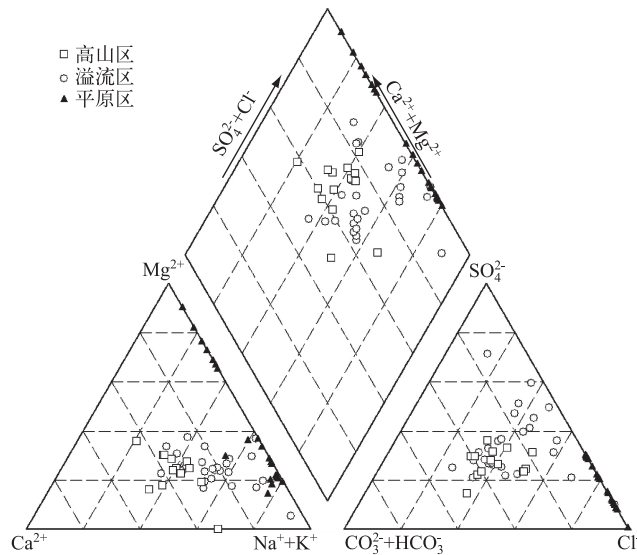


图2 尕斯库勒盐湖区不同区域水化学类型

Fig.2 Piper plot of the chemical compositions for different regions in the Gas Hure salt lake

3.1.2 水体理化参数 水体理化参数可以反映水体流经含水层的氧化还原条件和识别补、径、排规律。高山区—溢流区—盐湖区 pH 值变化呈现出弱碱性—弱酸性(图 3)。库拉木拉克萨伊河和阿特阿特坎河水体 pH 值范围为 8.01~8.93,平均值为 8.29,溢出带区 pH 值范围为 7.75~8.86,平均值为 8.24,其大小与补给河水基本无变化,而在祁漫塔格山前局部地区 pH 较低。在盐湖区主要受蒸发作用水体演化为氯化物或氯化镁型卤水,pH 范围为 6.20~7.81,平均值为 7.35。

水体的 Eh 值对划分含水层氧化还原带具有重要的指示意义。高山区河水水体 Eh 值呈强氧化特征,Eh 值范围为 232.00~274.00 mV,平均值为 256.58 mV;溢出带水体的 Eh 值范围为-113.00~237.67 mV,平均值为 104.94 mV,其中 GQ15-4、GQ15-9 和 GQ15-10 的 Eh<0,为还原性水体;平原区水体的 Eh 范围为 152.00~242.00 mV,平均值为 174.70 mV(表 1,图 3)。从采样点的分布情况来看,阿尔金山前含水层大体上处于氧化带,祁漫塔格山前局部含水层位于还原带,而在平原区横向上水体呈氧化环境,垂向上 ZK06 I~V 含水层呈氧化环境,说明 ZK06 含水层与周围水体具有水力联系。

EC 是水体总溶解离子的总体反映,在一定程度上反映水体在流域水循环过程中径流路径和滞留时间的长短。EC 大体上从高山区—溢流区—平原区是由低到高的趋势(平均值:0.91~6.02~155.97 mS/cm)(图 3)。根据资料表明^[9],高山区河流平均流速为 3.754 m/s,KLMH 河流和 ATKH 河流量分别为 3.2~4.6 和 2.2~4.1 m³/s,水流速度较快,瞬时流量较大,水在运移过程中,在岩石中滞留时间较短,从而矿化度低。在溢出带,EC 变化范围为 0.30~55.30 mS/cm,平均值为 6.02 mS/cm,说明溢出区水岩之间的接触时间较长,水流速度较慢。GJ10-4、GX15-4、GX10-1 样点的 EC 值较高(表 1),说明其水体径流时间较长,可能具有区域循环水的特点。而在平原区,由于受到蒸发作用,水体的阴阳离子得到极大的浓缩,EC 值范围为 83.29~213.26 mS/cm,平均值为 151.90 mS/cm。

TDS 与 EC 值的分布规律基本一致(图 3)。高山区水体的 TDS 范围为 0.33~1.05 g/L,平均值为 0.50 g/L;溢流区水体的 TDS 范围为 0.24~45.06 g/L,平均值为 4.36 g/L,而在油砂山前 GJ10-4、GX15-4、GX10-1 样点 TDS 值异常;平原区 TDS 值范围为 126.38~397.61 g/L,平均值为 298.93 g/L。

3.1.3 尕斯库勒盐湖成盐物质的来源 水体中元素的形成作用有:溶滤作用、脱硫酸作用、脱碳酸作用、阳离子交换吸附作用、混合作用与浓缩作用^[15]。研究表明:若水体中的 Na⁺来自石盐的溶解,则 Na⁺与 Cl⁻当量浓度比值为 1,若其比值大于 1,则说明还有来自硅酸盐的风化或其他钠盐的溶解。 $(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^- - SO_4^{2-})/(Na^+ - Cl^-)$

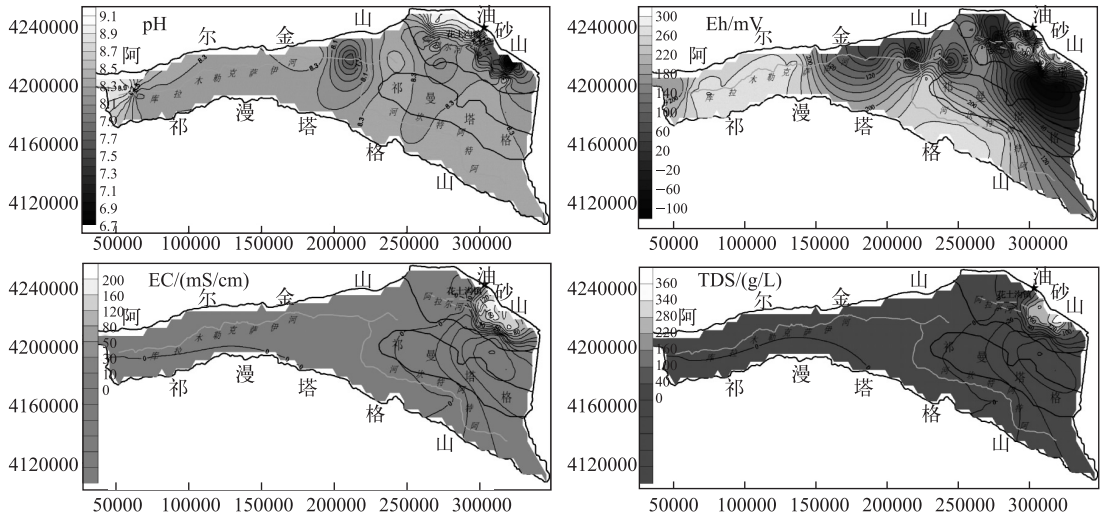


图3 研究区 pH、Eh、EC 和 TDS 等值线

Fig.3 pH, Eh, EC and TDS isoline of the study area

的当量浓度比值常被用于研究区域阳离子交换吸附作用^[16],若水体中 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 被 Na^+ 交换,则 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}) < 0$,反之 > 0 ;同样的如果水体中 Na^+ 被 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 交换,则 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-) < 0$,反之 > 0 。 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的比值可以判断水体中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源. 若其比值为 1:1,则 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来源于碳酸盐的风化;若其比值 < 1 ,则其他矿物的溶解对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 具有补给作用. 通过 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值的相关性可判别水体流过程中是否存在硫酸盐矿物^[17-20].

高山区和溢流区水体中 Na^+ 与 Cl^- 当量浓度比值在 1:1 线附近(图 4a),说明水体中 Na^+ 与 Cl^- 来自岩层石盐的溶解;平原区部分采样点的 $\text{Na}^+/\text{Cl}^- < 1$,即 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-) < 0$,结合图 4d 表明,平原区水体中的 Na^+ 主要来自阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 交换吸附, Cl^- 来自石盐溶解或蒸发浓缩. 高山区、溢流区和平原区水体中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 不仅来源于碳酸盐的风化,还受到其他矿物溶解补给(图 4b). 尕斯库勒盐湖周边地带自全新世以来富集 KCl,地层中还有储量可观的石膏^[3],很好地解释了这一现象. 从高山区、溢流区和平原区水体中 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 与 $(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的平均比值分别为 1:1.42、1:1.67 和 1:3.68,偏离 1:1 线,进一步说明水体流经地层中含有硫酸盐矿物(图 4c).

3.2 讨论

3.2.1 成盐元素的来源 Gibbs 图被用于分析水体的成因类型,即岩石风化、蒸发以及大气降水成因^[21-22]. 研究区水体以岩石风化和蒸发成因为主(图 5). 通过各类输入源的质量平衡 ($R_{\text{地下水}} = R_{\text{大气降水}} + R_{\text{碳酸盐风化}} + R_{\text{硅酸盐风化}} + R_{\text{蒸发盐风化}}$) 计算各类输入源对水体中溶质的贡献率^[23-24]. 计算过程中由于采样点 KLMH15-1 位于河流源头,故将其离子浓度近似认为大气降水的输入值,假设 $\text{Ca}^{2+}_{\text{蒸发}} = 0$. 冰川融水对地下水溶质的贡献最小,在溢出带地下水中溶质来源于碳酸盐(35.60%)、蒸发盐(34.99%)和硅酸盐(23.52%)的风化;平原区地下水中溶质主要来源于碳酸盐风化(63.89%)和蒸发盐风化(35.92%)(表 2). 资料表明^[3],溢出带祁漫塔格山前及阿尔金山前由于构造运动导致第三系地层中沉积了大量的碳酸盐(方解石、白云石),蒸发盐(石膏、钾盐、钠盐)主要赋存于油砂山组,沉积的 KCl 储量为 $1.470 \times 10^7 \text{ t}$,NaCl 储量为 $2.541 \times 10^9 \text{ t}$ ^[9]. 这些岩层中的成矿元素遭受淋滤并随地表和地下径流迁移到湖泊中,它们自上新世末以来一直在持续不断地补给盐湖,是现代盐湖盐类物质的主要来源.

一般来讲,当 $\text{Ca}^{2+}(\text{meq/L}) > \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 时,表明卤水具有深源补给特征^[25]. 由表 1 计算结果表明,GJ10-4、GJJ15-7 和 GJJ15-10 样点的 $\text{Ca}^{2+}(\text{meq/L}) - (\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) > 0$,具有深源特征. 尕斯库勒盐湖卤水和晶间卤水水化学类型为硫酸镁亚型盐湖,正常情况下水体中硫酸盐浓度较高,但从 GJ10-4、GJJ15-7

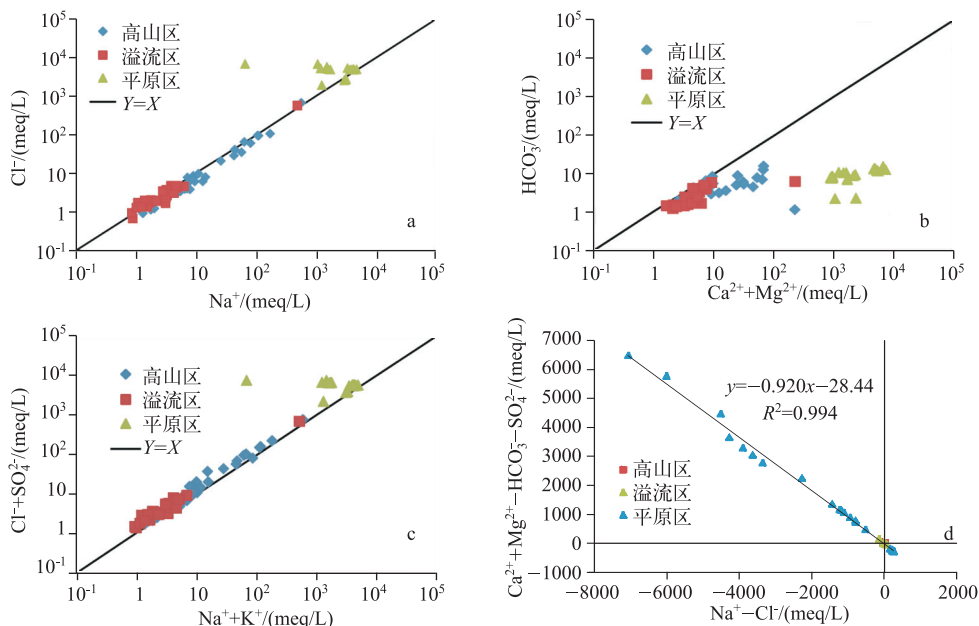


图 4 元素比值之间的关系

Fig.4 Relation graphs of elements (in meq/L) in different regions of the Gas Hure salt lake, Qaidam Basin
 (a) The plot of Cl^- versus Na^+ ; (b) the plot of HCO_3^- versus $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$; (c) the plot of $(Cl^- + SO_4^{2-})$ versus $(Na^+ + K^+)$; (d) the plot of $(Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-})$ versus $(Na^+ - Cl^-)$.

和 GJJ15-10 样点水化学特征来看,推断其是因硫酸盐型卤水和富 Ca^{2+} 较淡深成水掺杂作用的结果. 柴达木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活动而火山活动形成地热水中含有丰富的 K^+ 、 B^{3+} 、 Li^+ 等,再加上尕斯库勒盐湖为叠置在更新世之上的一个第四纪全新世断陷湖盆,其构造区内分布着很多断裂带(图 1),为深源物质提供输送通道成为可能^[11]. 研究表明,尕斯库勒石盐中锶含量较高的现象指示盆地有锶的补给源,补给源与周边山系中的火山地热活动有关^[3,9]. 因此,尕斯库勒盐湖成盐元素的来源一部分来源受冰川融水的淋滤作用迁移富集作用而成;另一部分来物质来源与火山地热水的补给有关.

表 2 不同输入源对地下水溶质的贡献比值

Tab.2 Contribution ratios of different sources in the region 2 and region 3

输入源类型	计算公式	贡献值 (溢流区)	贡献值 (平原区)
冰川融水	$R_{\text{冰川融水}} = (\sum(\text{阳离子}) / Cl^-)_{\text{冰川融水}} \times Cl^-_{\text{降水}}$	5.89%	0.04%
硅酸盐风化	$TZ^+_{\text{硅酸盐风化}} = 2Ca^{2+}_{\text{硅酸盐风化}} + 2Mg^{2+}_{\text{硅酸盐风化}} + Na^+_{\text{硅酸盐风化}}$	23.52%	0.15%
碳酸盐风化	$TZ^+_{\text{碳酸盐风化}} = 2(Ca^{2+}_{\text{地下水}} - Ca^{2+}_{\text{硅酸盐风化}} - Ca^{2+}_{\text{蒸发}} - Ca^{2+}_{\text{降水}}) + 2(Mg^{2+}_{\text{地下水}} - Mg^{2+}_{\text{硅酸盐风化}})$	35.60%	63.89%
蒸发盐风化	$R_{\text{蒸发盐风化}} = 100\% - (R_{\text{大气降水}} + R_{\text{碳酸盐风化}} + R_{\text{硅酸盐风化}})$	34.99%	35.92%

3.2.2 水力作用与成盐元素的分布规律 水化学类型和理化参数显示,高山区河流与溢出带出露水体存在局部水力联系,而溢出带区油砂山前(GJ10-4、GX15-4、GX10-1 样点)水体与高山区水体存在区域水力联系,溢出带祁漫塔格山前 Q15-4、Q15-9 和 Q15-10 样点为还原性水体,可能存在独立的水流系统;在平原区 ZK06 各含水层接受河流补给,存在区域地下水流系统之外,GJ10-4、GJJ15-7 和 GJJ15-10 样点还接受深部火山地热水的补给,水体明显的 Ca^{2+} 富集,贫 SO_4^{2-} . 通过局部和区域间的水力联系,最终将成盐元素输送至排泄区. 其水力联系如图 6 所示.

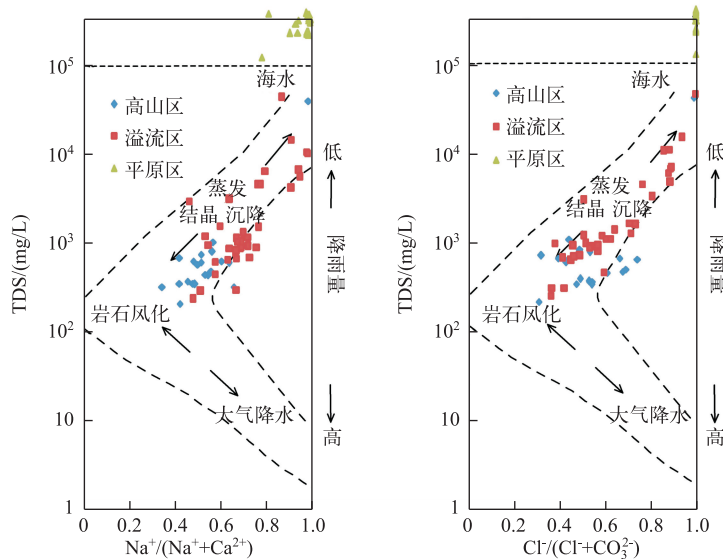


图5 柴达木盆地尕斯库勒盐湖区各类水体的 Gibbs 图解

Fig.5 Gibbs plots indicating the mechanisms that determine major elements composition of different regions in the Gas Hure salt lake, Qaidam Basin

特定的水文地球化学参数可以刻画水动力条件和水化学演化趋势,其中 $\gamma_{Cl^-}/\gamma_{Ca^{2+}}$ 比值和氯迁移系数 ($K_{Cl^-} = (m_{Cl^-} \times 100) / a \cdot n_{Cl^-}$. 式中: m_{Cl^-} 为 Cl^- 在水中的浓度 (g/L); a 为水的矿化残渣 (g/L); n_{Cl^-} 为 Cl^- 在岩石中的百分含量, 为 $4.72 \times 10^{-2[26]}$) 作为刻画水动力特点的参数, 可以反映不同水文地质单元的水动力特征^[27]. 分析结果表明(表3), 宏观上从高山区到平原区水动力条件逐渐减弱, 溢出带地下水转为地表水, 在强烈的蒸发作用下, 有利于 Cl^- 的富集, TDS 值升高. Ca^{2+} 是低 TDS 水体的主要离子, 当水动力条件减弱时, 其浓度降低, 形成了在高山区以碳酸盐型水体类型为主, 在溢流区以 $HCO_3^- \cdot Cl^- \cdot Ca \cdot Na$ 型水体为主, 在平原区形成了富 Cl^- 的高浓度卤水.

ZK06 显示(表3), $\gamma_{Cl^-}/\gamma_{Ca^{2+}}$ 值在含水层 I ~ II 呈增大趋势, 在含水层 III ~ V 之间, $\gamma_{Cl^-}/\gamma_{Ca^{2+}}$ 值减小, 说明水动力条件在含水层 I ~ II 之间随着深度的增加而减弱, 在含水层 III ~ V 之间随着深度的增大而增强. 据钻孔资料^[28], 含水层 I ~ II 之间的隔水层为黏土层, 黏土层孔隙度很小, 含水层 I ~ II 之间无越流补给; 而 III ~ V 之间的隔水层为含石膏或石盐的泥岩, 孔隙度与黏土层较大, 在含水层 III ~ V 之间可能存在越流混合现象.

从局部地区来看, 在溢出带 GQ15-8、GJ10-3 采样点的 $\gamma_{Cl^-}/\gamma_{Ca^{2+}}$ 比值小于 1, 说明在 GQ15-8 和 GJ10-3 采样点附近贫 Cl^- 、富 Ca^{2+} , 水动力条件较好; GQ15-9、GJ15-2 和 GJ10-3 样点水体中 Cl^- 浓度低于溢流区其他水体, 这些水体主要集中在阿拉尔断裂带和祁漫塔格断裂带附近, 说明此局部地带水动力条件优越, 不利于 Cl^- 的富集. 资料表明^[9] 祁漫塔格山前地下水较为丰富, 含水层岩性为含砾粗中砂, 孔隙度较大, 富水性较强, 这可能是该区水动力条件充足的原因.

成盐元素在水动力条件优越的地带 Cl^- 浓度小, 而 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 浓度较高, 水化学类型为碳酸盐型水为主, 属于淡水或咸水. Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 在空间上的分布规律基本与 Cl^- 相似, 在水动力优越的地带, 其离子浓度较低, 而在平原区水动力条件变差的地带, 这些元素得到富集.

总之, 在整个水流系统中水体之间的水力联系保证了蚀源区成盐元素能够从高山区最终富集到盐湖区形成盐类矿物, 而水动力条件影响着成盐元素在空间上的分布规律, 从而在盐湖区形成不同类型的水体. 因此, 在盐湖资源的开采过程中, 必须充分考虑淡水的补给作用以及补给量等问题, 否则可能出现盐湖资源品位降低或水位埋深降低而出现死矿的现象.

表3 不同分区 $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$ 系数与 K_{Cl^-} 迁移系数
 Tab.3 The $\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$ ratios and K_{Cl^-} of different regions and aquifers

参数	高山区	溢流区	盐湖区	
$\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$	4.46	5.91	248.38	
K_{Cl^-}	466.10	796.92	1085.08	
ZK06 水文地质参数特征 ($\gamma\text{Cl}^-/\gamma\text{Ca}^{2+}$)				
含水层 I (3.67 m)	含水层 II (19.70 m)	含水层 III (31.70 m)	含水层 IV (55.50 m)	含水层 V (61.00 m)
593.04	835.55	637.87	625.64	609.34

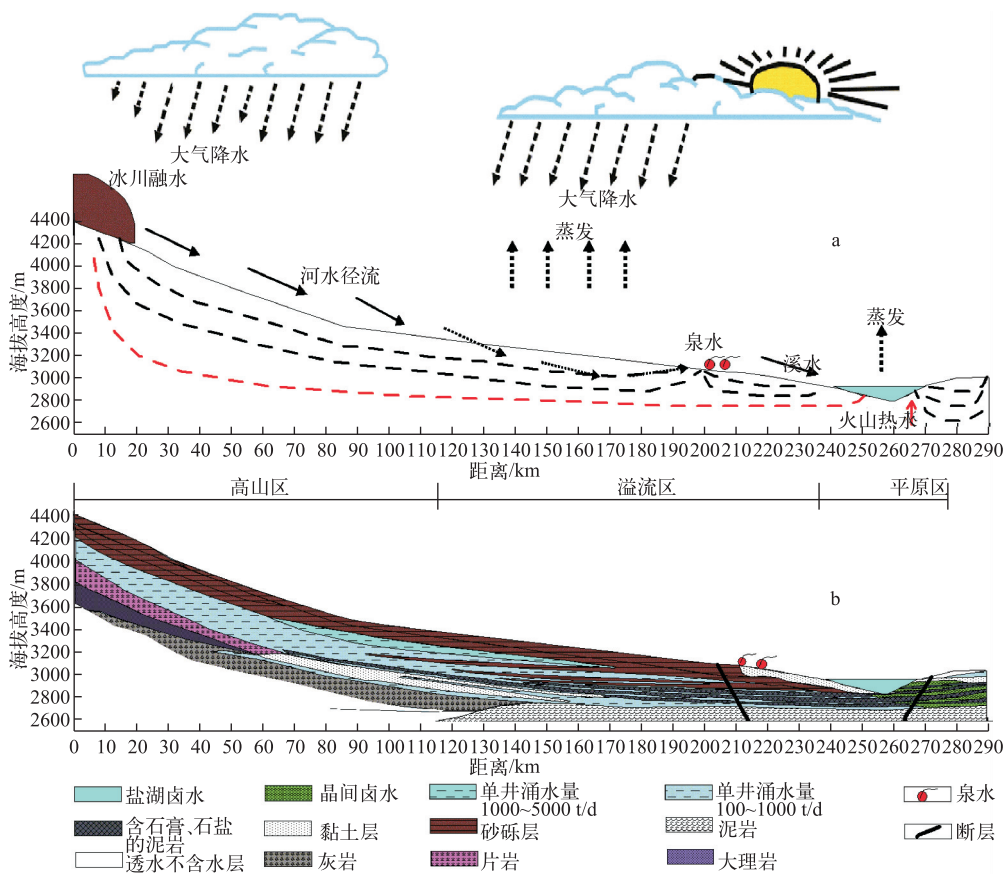


图6 区域地下水循环概念模式图 (a: 黑线代表局部地下水流系统; 红线代表区域地下水流系统)

Fig.6 Conceptual plots of groundwater system

(a: black line means local groundwater flow system; red line means regional groundwater flow system)

4 结论

本文从研究区整个流域系统内各类水体的理化参数和水化学特征, 探讨尕斯库勒盐湖成盐物质的来源、水动力条件和水力联系, 得出以下结论:

1) 尕斯库勒盐湖中的成盐物质一部分来源于蚀源区的碳酸盐、硅酸盐和蒸发盐的淋滤风化作用所致, 另一部分来源于深部火山热水补给。

2)从高山区到平原区随着含水层岩性的变细和地势逐渐变缓,水动力条件逐渐变差;在平原区随着深度的增大,在含水层 I ~ II 之间水动力条件呈现出随着深度的增加而减弱,在含水层 III ~ V 之间水动力条件随着深度的增大而变充足。

3)研究区水力联系较为复杂,在溢流区裸露地表而存在局部水流系统,而在油砂山前可能存在区域水流系统;而另一部分河流水体补给地下卤水,与 ZK06 各含水层之间具有区域水力联系,在干盐滩南部靠近祁漫塔格山前接受深部热水体的补给作用。

4)水动力条件与水力联系影响着成盐元素的迁移速度和含水层氧化还原带,二者对元素及 TDS 值在空间上的分布规律及水体演化具有明显影响。

5 参考文献

- [1] Yuan Jianqi, Yang Qian, Sun Dapeng *et al* eds. The formation conditions of the potash deposits in Charhan saline lake, Qaidam Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1995. [袁见齐,杨谦,孙大鹏等.察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件.北京:地质出版社,1995.]
- [2] Zhang Pengxi, Zheng Xiyu, Guan Yukui eds. Salt lakes of Qaidam Basin. Beijing: Science Press, 1987. [张彭熹,郑喜玉,关玉奎.柴达木盆地盐湖.北京:科学出版社,1987.]
- [3] Wei Xinjun, Shao Changduo, Wang Mili *et al* eds. Material composition, sedimentary characteristics and formation conditions of potash-bearing saline lakes in the western of Qaidam Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 145. [魏新俊,邵长铎,王弭力等.柴达木盆地西部富钾盐湖物质组分、沉积特征及形成条件研究.北京:地质出版社,1993: 145.]
- [4] Li Minghui, Fang Xiaomin, Yi Chaolu *et al*. Evaporite minerals and geochemistry of the upper 400 m sediments in a core from the Western Qaidam Basin, Tibet. *Quaternary International*, 2010, **218**(1-2): 176-189.
- [5] Tan Hongbing, Rao Wenbo, Ma Haizhou *et al*. Hydrogen, oxygen, helium and strontium isotopic constraints on the formation of oilfield waters in the western Qaidam Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, **40**(2): 651-660.
- [6] Huang Qi, Han Fengqing eds. Environmental evolution and ancient climate fluctuations in Saline Lakes of Qaidam Basin. Beijing: Science Press, 2007. [黄麒,韩凤清.柴达木盆地盐湖演化与古气候波动.北京:科学出版社,2007.]
- [7] Yu Junqing, Gao Chunliang, Cheng Aiyong *et al*. Geomorphic, hydroclimatic and hydrothermal controls on the formation of lithium brine deposits in the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau, China. *Ore Geology Reviews*, 2013, **50**: 171-183.
- [8] Yang Yibo, Fang Xiaomin, Koutsodendris Andreas *et al*. Exploring Quaternary paleolake evolution and climate change in the western Qaidam Basin based on the bulk carbonate geochemistry of lake sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, **446**(15): 152-161.
- [9] Rong Guangzhong, Tian Xibao, Li Yunping *et al*. Potash detailed survey report in the Gas Hure salt lake, Qaidam Basin. Qinghai: Qinghai Geological Survey Institute, 2003. [荣光忠,田希宝,李云平等.青海省茫崖镇尕斯库勒钾矿详查报告.青海:青海省地质调查院,2003.]
- [10] Qi Jiaying. Reservoir-forming characteristics of paleogene and neogene in Alar fracture belt [Dissertation]. Xi'an: Northwest University, 2012. [漆佳莹.阿拉尔断裂带古近系—新近系油气成藏特征[学位论文].西安:西北大学,2012.]
- [11] Ye Chuanyong, Wang Zhiming, Zheng Mianping *et al*. Simulation experiments on the uraniferous possibility of peripheral rock series and sediment from Gas Hure salt lake, western Qaidam Basin. *Science & Technology Review*, 2014, **32**(35): 61-71. [叶传勇,王志明,郑绵平等.柴达木盆地西部尕斯库勒盐湖周缘岩系和湖内沉积物含铀性模拟.科技导报,2014, **32**(35): 61-71.]
- [12] Wang Huanfu, Ye Siyuan. The formation of brine form distribution and evaluation research in the Gas Hure salt lake, Qaidam Basin. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1992, (8): 51-77. [王焕夫,叶思源.柴达木盆地尕斯库勒湖区含钾卤水形成、分布规律和总和评价研究.中国地质科学院水文地质工程地质研究所所刊,1992, (8): 51-77.]
- [13] Wang Yonghe, Xiao Peixi, Pan Changli *et al*. The regional geological survey of the People's Republic of China (A Wushijie area, 1: 250000). Wuhan: China University of Geosciences Press, 2013. [王永和,校培喜,潘长利等.中华人民共和国区域地质调查报告(苏吾什杰幅,1: 25万).武汉:中国地质大学出版社.]
- [14] Li Dunpeng, Li Xinlin, Wang Xiangli *et al*. The regional geological survey of the People's Republic of China (Ayak kumu lake area, 1:250000). Wuhan: China University of Geosciences Press, 2013. [黎敦鹏,李新林,王向利等.中华人民共和国区域地质调查报告(阿亚克库木湖幅,1:250000).武汉:中国地质大学出版社.]

- 共和国区域地质调查报告(阿雅克库木湖副, 1:25万). 武汉: 中国地质大学出版社, 2013.]
- [15] Wang Dachun ed. General hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House, 2006. [王大纯. 水文地质学基础. 北京: 地质出版社, 2006.]
- [16] Herczeg AL, Edmunds WM eds. Environmental Tracers in subsurface hydrology. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [17] Sarin MM, Krishnasswami S. Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river systems. *India Nature*, 1984, **312**: 538-541.
- [18] Han GL, Liu CQ. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: A study of the river waters draining karst-dominated terrain Guizhou Province, China. *Chemical Geology*, 2004, **204**: 1-21.
- [19] Zhu BQ, Yang XP. The ion chemistry of surface and groundwaters in the Taklimakan desert of tarim Basin, western China. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(15): 2123-2129.
- [20] Bo Ying, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng *et al.* Saline spring hydrochemical characteristics and indicators for potassium exploration in southwestern and northern Tarim Basin, Xinjiang. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, **34**(5): 594-602. [伯英, 刘成林, 焦鹏程等. 塔里木盆地西南部和北部盐泉水化学特征及找钾指标探讨. 地球学报, 2013, **34**(5): 594-602.]
- [21] Gibbs RJ. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [22] Feth JH, Gibbs RJ. Mechanisms controlling world water chemistry: Evaporation-crystallization process. *Science*, 1971, **172**: 871-872.
- [23] Stallard RF, Edmond JM. Geochemistry of the Amazon 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge. *Journal of Geophysical Research*, 1981, **86**: 9844-9858.
- [24] Stallard RF, Edmond JM. Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. *Journal of Geophysical Research*, 1983, **88**: 9671-9688.
- [25] Lowenstein TK, Risacher F. Closed Basin brine evolution and the influence of Ca-Cl inflow waters: Death V alley and Bristol Dry Lake California, Qaidam Basin, China, and Salar de Atacama, Chile. *Aquat Geochem*, 2009, **78**(15): 71-94.
- [26] Chen Jun, Wang Henian eds. Geochemistry. Beijing: Science Press, 2004. [陈俊, 王鹤年. 地球化学. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [27] Shen Zhaoli, Liu Guangya, Yang Chengtian *et al* eds. Hydrogeology. Beijing: Science Press, 1985. [沈照理, 刘光亚, 杨成田等. 水文地质学. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [28] Ye Chuanyong, Wang Zhiming, Zhao Shiqin *et al.* The relationship between U, Th distribution and sedimentary cycle of ZK06, Gas Hure salt lake. *Mineral Deposits*, 2014, **31**(supp): 235-236. [叶传勇, 王志明, 赵世勤等. 青海省尕斯库勒盐湖 ZK06 钻孔铀、钍含量分布与沉积旋回的关系. 矿床地质, 2014, **31**(增刊): 235-236.]