

昌都地区盐泉水化学特征与找钾研究

秦西伟^{1,2,3}, 马海州^{1,2}, 张西营^{1,2}, 樊启顺^{1,2}, 程怀德^{1,2},
李永寿^{1,2}, 苗卫良^{1,2}, 海擎宇^{1,2,3}, 石海岩⁴

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008; 2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 青海省地质调查局, 青海 西宁 810001)

摘要:昌都地区发育有大量的膏盐、白云石及菱镁矿, 研究其区域成钾潜力意义重大。在对昌都盆地蒸发岩矿点实地考察过程中, 共采集 12 个盐泉水样及 2 个泉水样。通过常量微量元素及水化学特征系数研究, 查明研究区盐泉水水化学类型为氯化物型和硫酸钠亚型, 属于岩盐溶滤成因, 溶滤了大量的石盐和少量的碳酸盐岩及硫酸盐岩, 纳西盐井盐泉水同时还受深部循环水的影响。昌都地区盐泉水样中 Na、Cl 含量及矿化度由北向南逐渐降低, Br、Li、B 含量较低, 整体上呈现以贡觉为中心, 向北、向南逐渐增高的变化趋势。研究区盐泉水具有内陆盐湖性质, 北部含盐地层更具海相成因特征, 盆地由北至南从海相沉积环境逐渐过渡为内陆海沉积环境, 受陆表水影响愈大。研究表明, 类乌齐含盐地层经历了最强烈的浓缩蒸发及岩盐溶滤作用, 其浓缩阶段晚于纳西及贡觉含盐带, 其成钾潜力同样也优于纳西及贡觉含盐带, 可作为钾盐矿异常点。贡觉和纳西含盐地层在不同程度上受到了陆表水的影响。综合对比前人研究成果, 发现囊谦—昌都—兰坪盆地自北向南, 成钾潜力逐渐变优。

关键词:昌都盆地; 找钾; 盐泉水; 水化学特征; 水化学系数

中图分类号: P641.5

文献标识码: A

文章编号: 1008 - 858X(2017)02 - 0028 - 12

1 引言

盐类沉积是地表浓缩卤水经过蒸发、析盐沉淀作用形成。析盐沉淀的顺序依次为碳酸盐、硫酸盐及氯化物, 而易溶、易迁移的钾盐在盐类沉积的晚期才会出现。自然界中的水因其流动性和对岩盐的淋滤作用, 可以作为钾盐矿床良好的指示剂, 世界上大多数钾盐矿床最初就是根据出露地表的含盐水或卤水发现的, 如加拿大的萨斯喀彻温钾盐矿床、中亚钾盐盆地及俄罗斯东西伯利亚钾盐盆地等。内陆盐湖区盐类沉积周围分布着湖表卤水、晶间卤水、溶滤

水体及深部水体和混合水体^[1]。通过研究盐类沉积周围出露的这些水体, 不仅可以指示成盐盆地卤水的成因演化, 而且对于岩盐分布区成钾潜力的评估、成钾区域的圈定具有重要意义。青海囊谦盆地和西藏昌都盆地出露有大量的盐泉水^[2-6], 同时昌都盆地还广泛分布膏盐、文石、白云石及菱镁矿沉积^[7], 推测该含盐带可能具备找钾前景。四川省地质局第三区测队(1974 年)曾先后对昌都贡觉红层及油扎盐泉进行勘查, 西藏自治区地质一大队(1967, 1971, 1972 年)3 次对油扎、察托盐点进行勘查工作^[5-6]。基于前人工作, 项目组于 2014 年 11 月在昌都盆地蒸发岩矿点考察时, 采集相关水

收稿日期: 2015 - 11 - 10; 修回日期: 2017 - 03 - 05

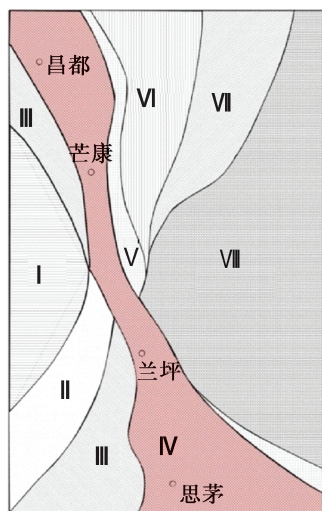
基金项目: 国家 973 项目资助

作者简介: 秦西伟(1989 -), 博士研究生, 主要研究方向为区域盐湖地球化学。Email: 495975224@qq.com。

样,展开水化学分析,以期判断卤水成因及成钾潜力。

2 区域地质背景

青藏高原由昆仑地块、巴颜喀拉地块、羌塘—昌都地块、冈底斯地块、喜马拉雅地块构成^[8-12]。昌都地块位于藏东三江构造带,是3个陆块(察隅陆块,昌都—思茅陆块,中咱陆块)沿两条结合带(碧土—昌宁结合带,金沙江—哀牢山结合带)经洋壳的消减、碰撞形成的复杂造山带(图1)。其发展、演化经历了威尔逊旋回的6个阶段:1)震旦纪至泥盆纪初的稳定克拉通沉积阶段;2)石炭纪至早二叠世的洋盆开启—扩张阶段;3)晚二叠世时期的消减封闭阶段;4)早三叠世至中三叠世的碰撞阶段;5)晚侏罗世—古近纪时期的超碰撞阶段;6)古近纪之后的陆内裂谷形成、昌都裂谷盆地形成阶段^[11]。研究区藏东类乌齐、左贡、察雅、盐井地区,地处三江构造带中段,是滇西与藏东、青南和川西衔接的关键部位,主要发育有早侏罗系及白垩系地层,同时出露大量古近系红层(表1)。



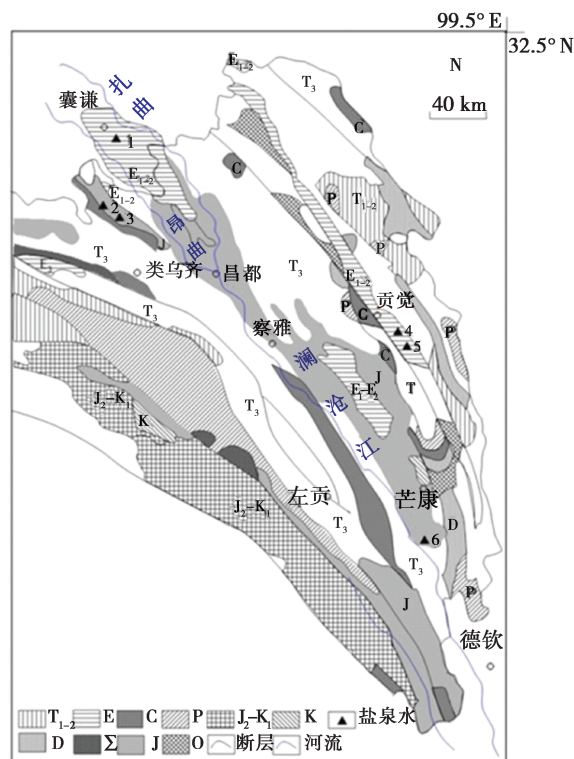
I 察隅地块 II 保山地块 III 碧土—昌宁结合带
IV 昌都—思茅陆块 V 金沙江—哀牢山结合带
VI 中咱陆块 VII 甘孜结合带 VIII 扬子陆块

图1 藏东—滇西三江带构造分区略图

Fig.1 Sketch map showing the structural areas of Sanjiang belt in Eastern Tibet-Western Yunnan

3 样品采集及分析

野外共采集12个盐泉水样及2个泉水样(表1,图2)。采样量为500mL,现场密封后作实验室分析,分析项目为 K 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Na 、 Ca 、 Mg 等常量化学成分及 Br^- 、 $B_2O_3(B)$ 、 Li 、 Sr 等微量化学成分。 K 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 采用常规重量法(误差 $\pm 0.5\%$)及滴定法(误差 $\pm 1\%$), Na 采用阴阳离子平衡差减法, Ca 、 Mg 、 Li 采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES), $B_2O_3(B)$ 采用甘露醇法及ICP-OES测定, Br^- 采用酚红分光光度法测定,以上测试误差均 $< \pm 5\%$ 。样品测试工作在中国科学院青海盐湖研究所完成(表2)。



1: BZ-01 2: GD-01(02) 3: ZC-01(02)
4: CT-01(02,03) 5: YZ-01(02,03) 6: NX-01(02,03)

图2 昌都地区地质及盐泉水采样点分布示意图

Fig.2 Map of geologic and distribution of salt spring water sampling points in Changdu area

表 1 西藏昌都地区盐泉水采样点野外记录

Table 1 Field records of salt spring water samples in Changdu area

采样地点 (自北向南)	出露地层	样品编号	备 注	水化学类型 (瓦良亚什科)
囊谦县白扎盐场	下古近系始新统 中部砂岩组 ^[3-4]	BZ-01	盐泉水	硫酸钠亚型
类乌齐县加桑卡乡	侏罗系中下统察雅群	GD-01	盐泉水	硫酸钠亚型
吉亚村	底部砖红色粉砂岩 ^[5]	GD-02	盐泉水	硫酸钠亚型
类乌齐县吉多乡	侏罗系中下统察雅群	ZC-01	盐泉水	硫酸钠亚型
早尺村	底部砖红色粉砂岩 ^[5]	ZC-02	盐泉水	硫酸钠亚型
贡觉县察托村	古近系贡觉组, 矿点位于油扎向斜西翼 ^[5]	CT-01	盐泉水	氯化物型
		CT-02	盐泉水	氯化物型
		CT-03	泉水	氯化物型
贡觉县油扎村	古近系贡觉组, 矿点位于油扎向斜东翼 ^[5]	YZ-01	盐泉水	硫酸钠亚型
		YZ-02	盐泉水	硫酸钠亚型
		YZ-03	泉水	硫酸钠亚型
芒康县纳西盐井乡 加达村	侏罗系花开左组(J ₂ h)、 漾江组(J ₁ y) ^[13-14]	NX-01	盐泉水	氯化物型
		NX-02	盐泉水	氯化物型
		NX-03	盐泉水	氯化物型

4 分析结果与讨论

4.1 常量离子的含量变化特征及水化学类型

研究区盐泉水矿化度变化范围较大,类乌齐吉亚村最高(ave. = 198.1 g/L),其次为囊谦白扎(97.28 g/L)及类乌齐早尺村(ave. = 70.38 g/L),其余盐泉均在 30.25 ~ 38.17 g/L 之间。盐泉水 pH 值在 7.10 ~ 7.66 之间,呈弱碱性,比重在 1.02 ~ 1.14 之间,其中类乌齐吉亚村比重最高(ave. = 1.13)。根据常规水化学找矿方法,TDS < 26 g/L 为无异常区;26 ~ 167 g/L 之间为低异常区;167 ~ 327 g/L 之间为异常区;TDS > 327 g/L 的为高异常区。纵观研究区盐泉水样,只有类乌齐吉亚村矿化度在异常区范围,其余均为低异常区。本文选取 TDS > 5 g/L 的盐泉水样进行评价。

水化学分析结果显示(表 2),8 个常量离子含量占总离子含量的 99% 以上,其中 Na⁺

(ave. = 26.42 g/L) 和 Cl⁻ (ave. = 42.43 g/L) 含量最高,与矿化度呈正相关。除白扎盐泉外,其余 11 个盐泉水样 Na⁺、Cl⁻ 含量及 TDS 逐渐降低。Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 的含量较高,Mg²⁺ 和 HCO₃⁻ 含量较低。K⁺ 含量均未超过 1 g/L,纳西盐井最高(ave. = 0.617 g/L),类乌齐吉亚村(ave. = 0.49 g/L)及早尺村(ave. = 0.24 g/L)次之,贡觉县油扎村(ave. = 0.09 g/L)及察托村(ave. = 0.08 g/L)最低。

根据瓦良亚什科水化学分类^[15],研究区盐泉水水化学类型为硫酸钠亚型及氯化物型,这与囊谦地区^[3-4]及云南兰坪一思茅盆地含盐带^[16-17]盐泉水化学类型保持一致。根据舒卡列夫水化学分类^[18],研究区所有盐泉水样均为 Na-Cl 型水,这与盐泉水常量元素三线图^[19]中呈现的趋势(阳离子聚焦于 Na + K 区域,阴离子聚焦于 Cl 区域)保持一致,而泉水样则以 Na-Ca-Cl 型及 Ca-Na-SO₄²⁻-Cl 型为主(图 3)。

表 2 昌都盆地盐泉水化学及水化学参数分析表

Table 2 Chemical composition and hydrochemistry parameters for salt spring water from the Changdu area

样品 编号	ρ	TDS	pH	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Br ⁻	B	Li ⁺	Si ²⁺	K × 10 ³ /Cl	K/Br	rMg/rCl	rNa/rCl	Br × 10 ³ /Cl	B × 10 ³ /Cl	K × 10 ³ /Σ盐	Li × 10 ³ /Σ盐
BZ-01	1.06	97.3	7.66	0.078	0.520	37.29	0.098	1.68	57.43	0.13	2.67	19.9	2.78	16.86	1.36	29.2	0.005	1.002	0.046	0.346	0.802	0.029
GD-01	1.11	167.6	7.56	0.412	0.748	64.23	0.199	2.05	99.60	0.29	17.8	9.69	3.70	16.65	4.14	23.2	0.006	0.995	0.178	0.097	2.46	0.022
GD-02	1.15	228.6	7.25	0.564	1.03	87.65	0.269	2.81	135.97	0.29	29.9	12.5	4.74	22.87	4.15	18.9	0.006	0.995	0.220	0.092	2.47	0.021
GD-ave	1.13	198.1	7.41	0.488	0.89	75.94	0.234	2.43	117.79	0.29	23.8	11.1	4.22	19.76	4.14	21.0	0.006	0.995	0.199	0.095	2.46	0.021
ZC-01	1.05	71.1	7.49	0.237	1.11	25.90	0.234	2.46	40.76	0.36	8.53	9.87	1.45	22.47	5.82	27.8	0.017	0.981	0.209	0.242	3.33	0.020
ZC-02	1.05	69.6	7.67	0.235	1.09	25.36	0.233	2.33	39.99	0.36	8.12	7.37	1.33	22.48	5.88	29.0	0.017	0.979	0.203	0.184	3.34	0.019
ZC-ave	1.05	70.4	7.58	0.236	1.10	25.63	0.234	2.40	40.38	0.36	8.33	8.62	1.34	22.47	5.85	28.4	0.017	0.980	0.206	0.213	3.36	0.020
CT-01	1.02	36.7	7.10	0.076	1.82	10.94	0.754	2.43	20.46	0.16	0.06	3.70	0.924	33.75	3.71	1 205	0.109	0.825	0.003	0.181	2.07	0.025
CT-02	1.02	36.7	7.10	0.086	1.81	10.86	0.819	2.47	20.47	0.17	0.08	4.95	0.992	36.75	4.19	1 099	0.118	0.818	0.004	0.242	2.33	0.027
CT-ave	1.02	36.7	7.10	0.081	1.81	10.9	0.787	2.45	20.47	0.16	0.07	4.32	0.958	35.25	3.95	1 152	0.114	0.822	0.003	0.211	2.20	0.026
CT-03	0.10	9.84	7.63	0.037	0.91	2.50	0.137	1.19	4.85	0.21	0.01	2.21	0.406	28.45								
YZ-01	1.02	38.16	7.31	0.094	1.25	12.7	0.338	2.89	20.64	0.19	0.06	6.12	0.567	22.77	4.55	1 678	0.049	0.951	0.003	0.297	2.46	0.015
YZ-02	1.02	38.16	7.34	0.087	1.26	12.8	0.323	2.79	20.72	0.198	0.04	6.05	0.557	22.02	4.18	2 016	0.046	0.950	0.002	0.292	2.27	0.015
YZ-ave	1.02	38.16	7.33	0.090	1.25	12.7	0.331	2.84	20.68	0.194	0.05	6.08	0.562	22.40	4.37	1 847	0.047	0.950	0.002	0.294	2.37	0.015
YZ-03	0.10	1.71	8.09	0.008	0.25	0.248	0.034	0.554	0.402	0.199	0.01	0.52	0.009	6.52								
NX-01	1.02	30.9	7.51	0.628	0.90	10.3	0.118	0.685	17.7	0.329	2.02	37.2	11.8	34.48	35.44	311.1	0.020	0.899	0.114	2.099	20.36	0.384
NX-02	1.02	30.6	7.58	0.634	0.94	9.41	0.594	0.725	17.7	0.406	1.88	38.5	12.1	34.85	35.77	337.0	0.099	0.820	0.106	2.176	20.73	0.396
NX-03	1.02	30.3	7.49	0.588	0.84	9.58	0.519	0.611	17.7	0.330	1.99	33.07	10.3	29.98	33.32	295.7	0.087	0.837	0.113	1.873	19.45	0.339
NX-ave	1.02	30.6	7.53	0.617	0.90	9.78	0.410	0.674	17.7	0.355	1.96	36.3	11.4	33.1	34.84	314.6	0.069	0.852	0.111	2.049	20.18	0.373

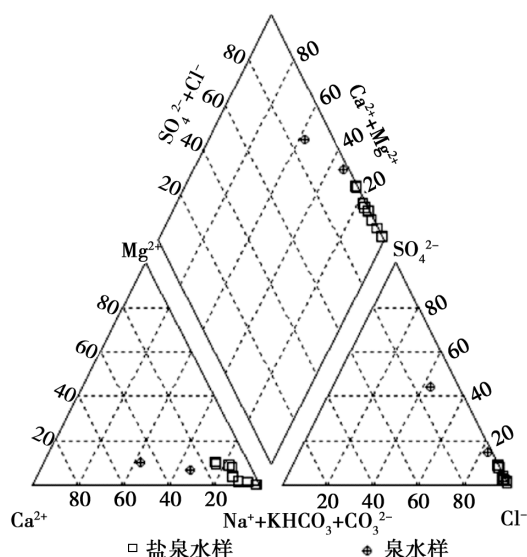


图 3 昌都地区盐泉水及泉水样常量元素三线图

Fig. 3 Piper plot showing the chemical variability of selected samples of the salt spring water and spring water in Changdu area

研究区盐泉水 Gibbs 图解表明(图 4),所有盐泉水样点均位于蒸发结晶作用控制区,

受强烈的蒸发作用影响,这与塔里木盆地西南部和北部盐泉水化学特征^[20-21]及青海囊谦高浓度盐泉^[4]一致。

析盐阶段的地表盐泉水或浅层晶间卤水处于蒸发浓缩和溶解的平衡状态。盐泉水中的钠氯摩尔浓度比值是反映盐泉水蒸发浓缩和岩盐溶滤作用的重要指标,青海湖和扎北盐湖作为青藏高原上最大的内陆咸水湖及藏北高原腹地盐湖,同研究区盐泉水作对比意义重大。 $\text{Na}-\text{Cl}$ 比值图(图 5)表明,研究区所有盐泉点均落在岩盐溶滤线上,靠近青海湖自然蒸发曲线^[22]及扎北盐湖蒸发曲线^[23],位于两者的上部,指示研究区盐泉水为岩盐溶滤成因,同时伴随着强烈的蒸发浓缩过程,具有内陆湖泊性质。 $(c\text{Na}/c\text{Cl})-\text{TDS}$ 分布图显示(图 6),青海湖湖水蒸发曲线随着蒸发浓缩,先保持稳定,后逐渐下降;而研究区盐泉水样则集中分布于青海湖自然蒸发曲线下方,靠近岩盐溶滤线,同样也反映含盐地层经历了强烈的蒸发浓缩过程及岩盐溶滤作用。

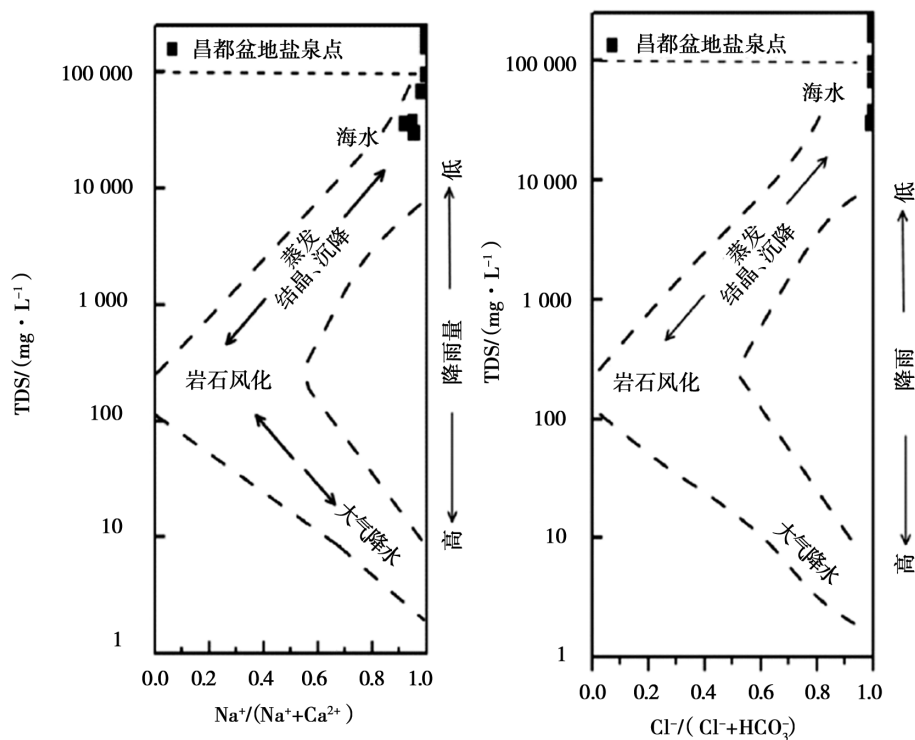


图 4 昌都地区盐泉水化学组成 Gibbs 图解

Fig. 4 Gibbs diagram for the hydrochemical compositions of salt spring in the Changdu area

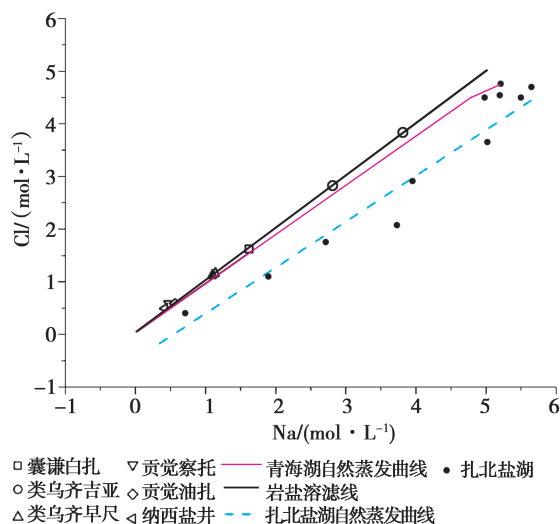
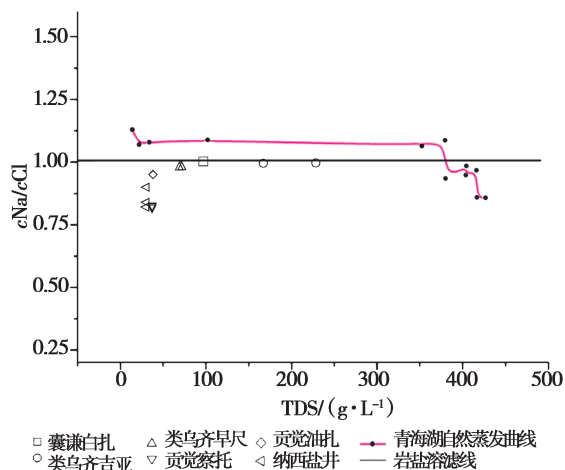
图5 昌都地区盐泉水 Na-Cl 比值图^[22-23]

Fig. 5 Distribution of Na-Cl of salt spring waters in Changdu area

图6 昌都地区盐泉水 (cNa/cCl) - TDS 分布图^[22]Fig. 6 Distribution of (cNa/cCl) - TDS of salt spring water in Changdu area

4.2 微量元素含量变化特征

盐泉水中微量元素(溴、硼、锂、锶)的含量变化,可以指示卤水的浓缩程度及卤水流经岩层的沉积环境^[24-25],是钾的间接指标。盐类矿物及残留液中 B、Br 含量越高,其卤水浓缩程度越高,盐类矿物的沉积阶段也越晚。水化学分析结果显示(表2),微量元素绝对含量较低,但相对富 B、Sr,低 Li、Br。

Br 主要以分散状态存在,一般不单独成矿,易形成溶于水的化合物及稳定的络合物^[26]。研究区盐泉水 Br 含量为 0.043 ~ 29.86 mg/L,类乌齐吉亚村含量较高(ave. = 23.81 mg/L),其次为类乌齐早尺村和纳西盐井,而贡觉油扎和察托含量最低(<1 mg/L),整体上呈现以贡觉为中心,向北、向南逐渐增高的变化规律。盆地盐泉水 Br 含量均低于中国南海海水蒸发曲线^[27],而类乌齐盐泉点更靠近南海海水蒸发曲线,表明含盐地层经历了更为强烈的浓缩蒸发阶段。除贡觉盐泉点外,其余均靠近青海湖湖水蒸发线(图7a),表明盐泉水具有内陆湖泊性质。

Li 是碱金属元素,以类质同像替代矿物结构中的 Mg,富集在岩石圈的上部及岩浆演化的晚期^[28]。研究区盐泉水 Li 含量为 0.56 ~ 12.11 mg/L,纳西盐井盐泉点 Li 含量(ave. = 11.4 mg/L)高于白扎盐场及类乌齐盐泉点,贡

觉盐泉点含量最低,呈现以贡觉油扎村为中心,向北、向南逐渐增高的变化规律。除纳西盐泉外,其余盐泉点 Li 含量略低于青海湖湖水蒸发曲线,并与其变化趋势保持一致(图7b),表明盐泉水的内陆湖泊性质。

硼是易溶元素,主要存在于上地壳岩系及水圈中^[29]。研究区盐泉水 B 含量为 3.7 ~ 38.54 mg/L,除纳西盐井村含量(ave. = 36.28 mg/L)较高外,其余盐泉水 B 含量均小于 20 mg/L,变化趋势与 Li 含量保持一致。盐泉水 B 含量低于扎北盐湖及青海湖蒸发曲线,高于南海海水蒸发线,类乌齐盐泉点接近南海海水蒸发曲线,纳西盐井村盐泉更接近青海湖蒸发曲线(图7c),盆地由北至南呈现从海相沉积环境逐渐过渡为内陆湖沉积环境的趋势,受陆表水影响加大,说明研究区北部含盐地层更具海相沉积环境,经历了更为强烈的浓缩蒸发阶段。

锶是典型的分散元素,主要以类质同像的形式分布于造岩矿物中。研究区盐泉水 Sr 含量为 16.65 ~ 36.75 mg/L,大致呈现由北向南递增的趋势。除类乌齐吉亚村盐泉水 Sr 含量接近海水蒸发线外,其余水样均偏离,纳西盐井盐泉水样远离南海海水蒸发曲线(图7d),这与 B 具有相同的指示意义。盆地北部呈现海相环境,越往南越靠近内陆湖沉积环境,受陆表水影响越大。

地下卤水 Cl/Br 比值是区分不同物源卤水

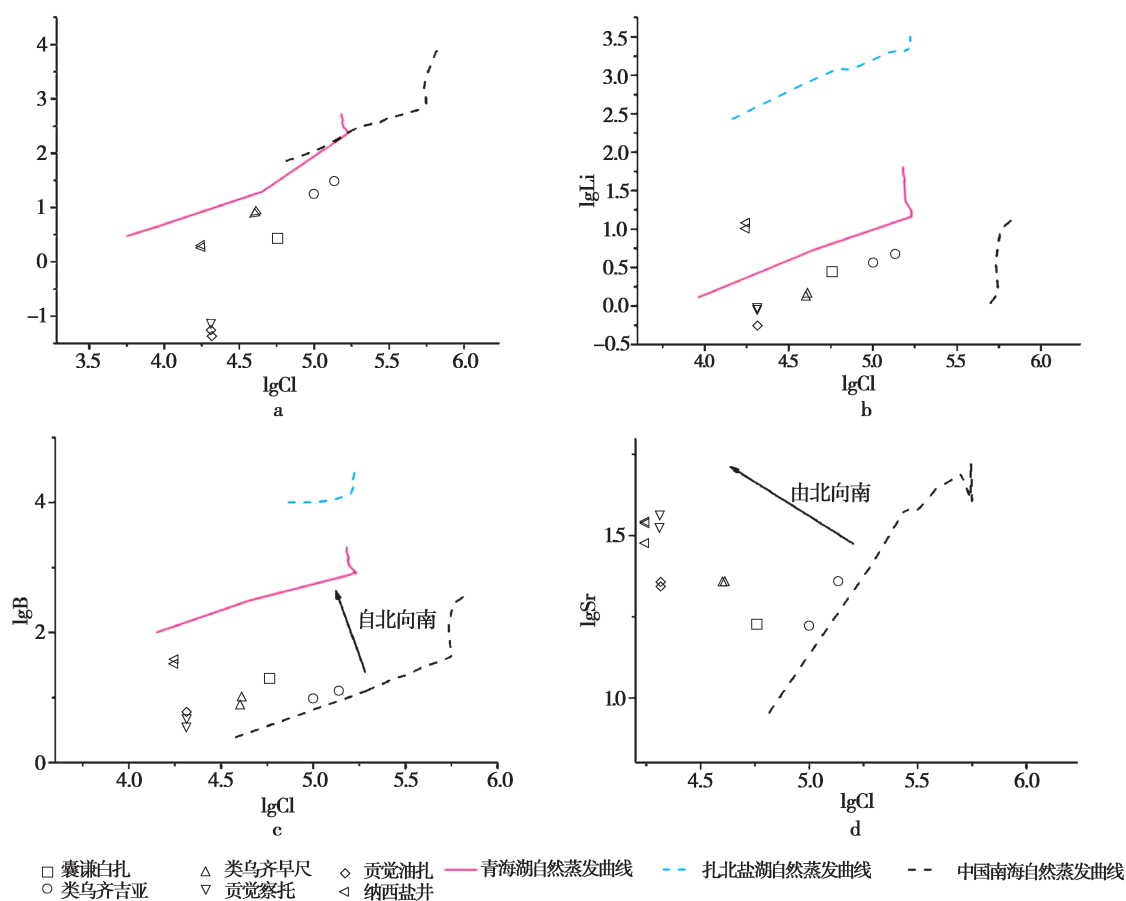


图 7 昌都地区盐泉水 Br、Li、B、Sr 与 Cl 含量对数分布图^[22-23,27]

Fig. 7 Logarithm distribution of Br、Li、B、Sr and Cl of salt spring water in Changdu area

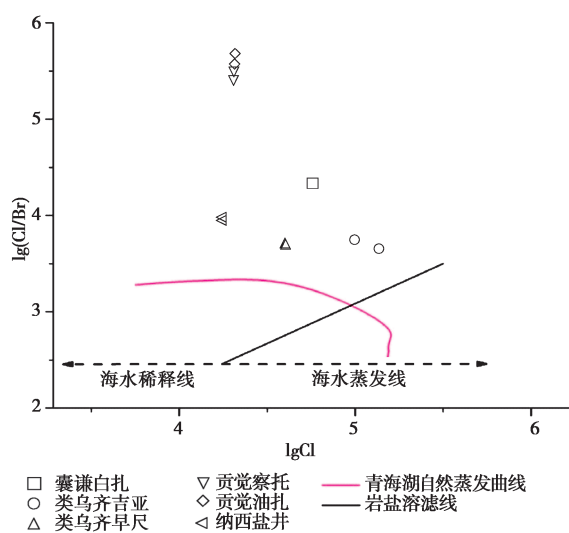


图 8 昌都盆地盐泉水 $\lg(\text{Cl}/\text{Br})/\lg\text{Cl}$ 分布图^[22,27]

Fig. 8 Distribution of $\lg(\text{Cl}/\text{Br})/\lg\text{Cl}$ of salt spring water in Changdu area

较好的指标^[30-32]。 $\lg(\text{Cl}/\text{Br}) - \lg\text{Cl}$ 分布图(图 8),青海湖自然蒸发曲线随矿化度的增加呈现出先缓慢增加后急速减小的趋势,表明湖水中的 Br^- 含量随湖水的不断浓缩蒸发而增大。贡觉与纳西盐泉点靠近海水稀释线,这可

能与地表水的影响有关^[14]。类乌齐盐泉靠近海水蒸发线和岩盐溶滤线,这可能与含盐地层形成时强烈的浓缩蒸发及盐泉经历的岩盐溶滤作用有关。

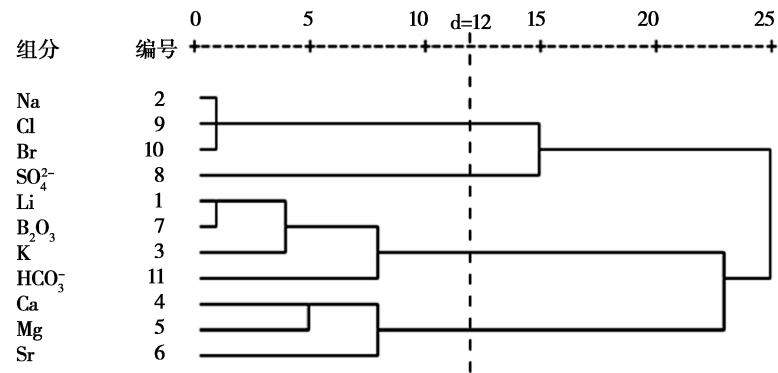


图 9 昌都地区盐泉水基本组分聚类分析谱系图

Fig. 9 Cluster analysis of basic compositions for salt spring from Changdu area

离子聚类分析是明确盐泉水中不同离子分类及相关程度的有效方法。从昌都地区盐泉水基本成分聚类分析谱系图看(图 9,以欧氏距离 12 为分类标准),Na、Cl、Br 首先聚为一类,说明研究区盐泉水为岩盐溶滤成因水;矿化度主要以 Na、Cl 离子含量为主,Br 与 Cl 伴生存在,聚为一类的 Na、Cl、Br 与 SO_4^{2-} 又聚为一类,说明研究区盐泉水中溶解了少量的硫酸盐,这与昌都地区分布的大量膏盐有关;Ca、Mg、Sr 聚为一类,说明盐泉水溶解了碳酸盐岩,可能与昌都地区分布的白云岩、文石、菱镁矿有关,而 Sr 与 Ca、Mg 以类质同像的形式存在。Li、B、K、 HCO_3^- 聚为一类,揭示了 K 与 Li、B 在物源上

相似,盐泉水与地表水的补给有关。上述信息反映研究区盐泉水演化过程较复杂。

5 盐泉水成因及水化学找钾分析

水化学特征系数可以用来判别卤水成因、含盐地层的浓缩程度、沉积环境及其成钾潜力^[33]。地下高矿化度盐泉水中盐分来源主要有两种途径,即沉积型卤水和溶滤型卤水^[34]。沉积型卤水是随海相地层沉积时封存的古海水,溶滤型卤水是地表水或地下水流经或渗入含盐地层时,不断咸化而成的卤水。以下水化学特征系数可判断卤水成因,包括镁氯系数

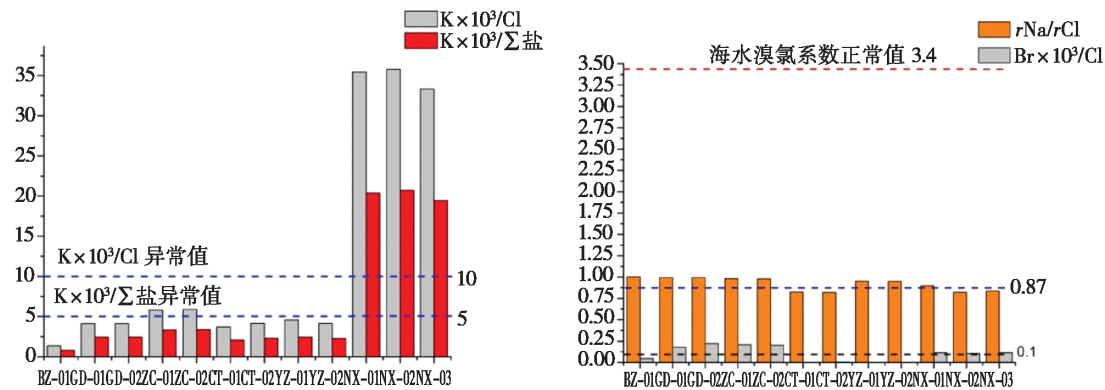


图 10 昌都地区盐泉水水化学参数对比图

Fig. 10 Hydrochemistry parameters contrast for salt spring water in the Changdu basin

(rMg/rCl)、钠氯系数(rNa/rCl)及溴氯系数($Br \times 10^3/Cl$)。钠氯系数(rNa/rCl)表示卤水中钠盐的富集程度,以 0.87 为界;溴氯系数是判别含盐地层蒸发浓缩阶段的重要指标;镁氯系数(rMg/rCl)可指示卤水成因。一般认为沉积型卤水的钠氯系数应小于 0.87,溴氯系数约等于 0.33;而溶滤型卤水的钠氯系数应为 0.87 ~ 0.99 或更高,溴氯系数为 0.08 ~ 0.33 或更小,但这一判别标准并不绝对,当溶滤钾盐、岩盐时,钠氯系数会低于 0.86,甚至会更低^[35]。研究区盐泉水样溴氯系数值在 0.002 ~ 0.209 之间,均小于 0.3,可判断盐泉水为溶滤型卤水。钠氯系数各有不同,白扎、类乌齐、贡觉油扎盐泉钠氯系数值均大于 0.85,而贡觉察托盐泉及纳西盐泉均低于 0.86,这可能与溶滤地下含钾岩层有关。镁氯系数与钠氯系数具有因果关系,海水浓缩实验显示^[27],在沉积过程中 Mg^{2+} 会优先富集在海相蒸发岩母卤中,沉积型卤水的镁氯系数相对较高,而石盐钾盐层的溶滤型卤水的镁氯系数在 0 ~ 0.16 之间^[36]。研究区盐泉水的镁氯系数值在 0.005 ~ 0.118 之间,均小于 0.16,这可能是地下水溶滤含石盐及含钾岩层所致。上述三大特征系数均指示研究区盐泉水为岩盐溶滤成因。

实际资料表明,钾盐系数($K \times 10^3/\Sigma \text{盐}$)、钾氯系数($K \times 10^3/Cl$)、钾溴系数(K/Br)是反映卤水富钾程度的直接找钾标志,而溴氯系数($Br \times 10^3/Cl$)、镁氯系数(rMg/rCl)则是反映卤水所溶滤含盐地层蒸发浓缩程度的间接找钾标志。钾盐系数($K \times 10^3/\Sigma \text{盐}$)表示钾在卤水总盐量中所占比例,也是溶滤型卤水最直接的找矿标志。钾氯系数($K \times 10^3/Cl$)和钾盐系数呈现正相关,随卤水浓度的增高而增大,若地下存在钾盐地层,其值会变高^[37]。当溶滤型卤水钾盐系数在 5 ~ 10,钾氯系数在 10 ~ 20 时,表明有异常存在,地下可能存在固体钾盐;当钾盐系数大于 10,钾氯系数大于 20 时,则说明异常明显,钾盐存在较为肯定,可能找到工业意义上的钾盐矿床^[38]。研究区仅有盐井盐泉钾盐系数(ave. = 20.177)、钾氯系数(ave. = 34.841)值明显超过异常值,类乌齐盐泉钾盐系数及钾氯系数值均在 2 ~ 4 及 4 ~ 6 之间,靠近异常值标

准(图 10)。在水化学找矿中,K 与 Br 的互存关系对寻找钾盐矿产意义重大。当钾溴系数值在 25 ~ 50 时,可能有找钾远景,大于 60 或小于

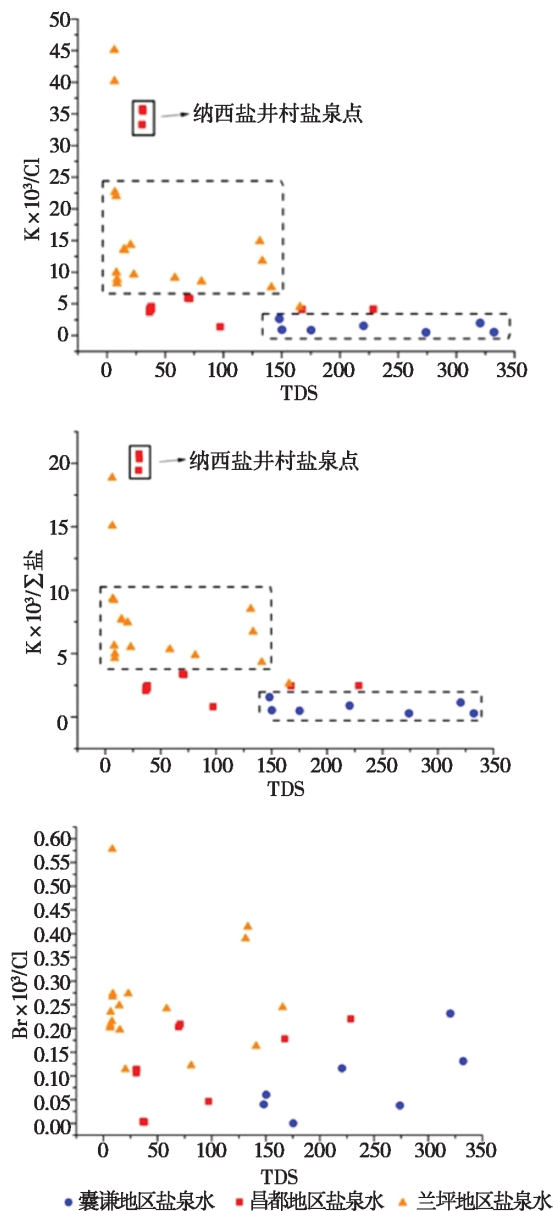


图 11 囊谦、昌都、兰坪地区找钾系数对比图

Fig. 11 Potassium coefficient contrast map for salt spring water in the Nangqian-Changdu - Lanping area

20 均无找钾远景,因为前者表明该地区贫溴,卤水可能为石盐淋滤水或陆相水,后者说明卤水中贫钾富溴,卤水成因为母卤或沉积型卤水。研究区白扎、类乌齐盐泉点钾溴值在 25 ~ 50 之间,其余盐泉点均大于 60,盐井盐泉贫溴,以下原因所致:

1) 盐井盐泉水补给区罗尼乡断裂接受了大量的大气降水补给^[14];

2) 盐泉多出露在靠近澜沧江边的河滩,其承压水头接近或低于澜沧江水位,进而与澜沧江水发生混合作用^[14,39]。

溴氯系数以 0.1 作为标准,大于 0.1 表明地下可能存在含钾盐层,高于 0.35,基本可以确定地下含有钾盐层。研究区只有类乌齐盐泉及盐井盐泉点溴氯系数值大于 0.1,表现异常,类乌齐含盐地层的浓缩阶段要明显晚于其它地区。研究区盐泉水溴氯系数值在 0.002 ~ 0.209 之间,低于海水正常值(3.47),推测该含盐系可能属于受陆表水强烈影响的内陆海作为物质来源的非典型海相沉积。综合上述各项指标,纳西盐井及类乌齐含盐地层具有找钾潜力,贡觉地区找钾潜力较弱。就含盐地层蒸发浓缩阶段而言,类乌齐晚于纳西盐井,纳西盐井晚于贡觉。

通过与囊谦^[3-4]、兰坪^[16]盐泉水化学数据综合对比发现(图 11),盐泉水矿化度由囊谦、昌都至兰坪地区(由北向南)逐渐增大。盐泉水钾盐系数、钾氯系数值除纳西盐井明显高于兰坪地区平均值外,同样也呈现出由北向南逐渐增大的趋势。就溴氯系数而言,昌都略高于囊谦,兰坪明显高于前两者。上述找钾指标均显示囊谦—昌都—兰坪地区自北向南,成钾潜力依次变优。

6 结 论

1) 昌都地区盐泉水以含 Na 和 Cl 为主,富 Ca 和 SO_4^{2-} ,贫 Mg 和 HCO_3^- ,TDS 及 Na、Cl 含量由北向南依次降低,水化学类型为氯化物型及硫酸钠亚型,属岩盐溶滤型成因水。溶解了大量的石盐、少量的碳酸盐岩及硫酸盐岩,盐泉水在形成过程中经历了强烈的浓缩蒸发。盐泉水微量元素含量普遍较低,Sr 含量变化范围较大,Br、Li、B 含量均呈现以贡觉油扎村为中心,向北、向南逐渐增高的变化规律,这与研究区成钾潜力保持一致。

2) $(c\text{Na}/c\text{Cl}) - \text{TDS}$ 、 $\lg(\text{Br}, \text{Li})/\lg\text{Cl}$ 、 $\lg(\text{Cl}/\text{Br})/\lg\text{Cl}$ 关系图显示,研究区盐泉水与青海湖自然蒸发曲线变化趋势保持一致,表明

盐泉水具有内陆湖泊的沉积环境。 $\lg(\text{B}, \text{Sr})/\lg\text{Cl}$ 、 $\lg(\text{Cl}/\text{Br})/\lg\text{Cl}$ 关系图显示,研究区北部含盐地层(类乌齐)更具海相成因性质,盆地由北向南从海相沉积环境逐渐过渡为内陆海沉积环境,受陆表水的影响也就变大。类乌齐含盐地层经历了最强烈的浓缩蒸发阶段,贡觉含盐地层受陆表水的影响较大,纳西盐井含盐地层接受了大气降水和澜沧江水的混合补给作用,受深部水的影响强烈。

3) 综合各项水化学特征系数,就找钾潜力而言,纳西盐井及类乌齐含盐带具有找钾远景,贡觉地区找钾潜力较弱。就含盐地层浓缩蒸发阶段而言,类乌齐晚于纳西盐井,盐井晚于贡觉。分析盐泉水所出露的含盐系地层,研究区早侏罗系含盐地层成钾潜力明显优于古近系红层。

4) 结合前人研究工作,发现囊谦—昌都—兰坪盆地自北向南,成钾潜力逐渐变优。

参考文献:

- [1] 樊启顺,马海州,谭红兵. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨[J]. 地球化学,2007,36(6):633-637.
- [2] 杜后发,朱志军,姜勇彪. 囊谦盆地贡觉组砂岩岩石学特征与物源分析[J]. 岩石矿物学杂志,2011,30(3):401-408.
- [3] 何蕾. 青海囊谦地区高浓度盐泉水化学特征研究[D]. 西宁:中国科学院青海盐湖研究所,2015:1-57.
- [4] 韩凤清,陈彦交,韩继龙,等. 青海囊谦高浓度盐泉硼同位素地球化学特征及其地质意义研究[J]. 地球学报,2016,37(6):723-732.
- [5] 四川省地质局第三区测队. 四川昌都地区石膏、盐泉踏勘简报[R]. 广元:四川省地质局第三区测队. 1980:1-101.
- [6] 西藏地质局第一地质大队. 西藏昌都地区地质及矿产[R]. 达孜:西藏地质局第一地质大队. 1977:1-203.
- [7] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域矿产总结[R]. 拉萨:西藏自治区地质矿产局,1994:1-877.
- [8] 侯增谦,卢记仁,李红阳. 中国西南特提斯构造演化—慢柱构造控制[J]. 地球学报,1996,17(4):339-453.
- [9] 杜德勋,罗建宁. 昌都地块沉积演化与古地理[J]. 岩相古地理,1997,17(4):1-17.
- [10] 刘朝基. 川西藏东板块构造体系及特提斯地质演化[J]. 地球学报,1995,2:121-134.
- [11] 钟康惠,唐菊兴,刘肇昌. 青藏东缘昌都—思茅构造带中生代陆内裂谷作用[J]. 地质学报,2006,80(9):

- 1295-1311.
- [12] 彭兴阶,胡长寿. 藏东三江带的大地构造演化[J]. 中国区域地质,1993,2:140-148.
- [13] 漆继红,许模,张强,等. 西藏盐井地区盐泉同位素特征示踪研究[J]. 地球与环境,2008,36(3):237-244.
- [14] 钱琳. 西藏芒康盐井盐泉地下热盐卤水形成及演化机理分析[D]. 成都:成都理工大学,2007:1-74.
- [15] 瓦良亚什科 M T. 钾盐矿床形成的地球化学规律[M]. 北京:中国工业出版社,1965.
- [16] Bo Y, Liu C. Chemical and isotopic characteristics and origin of spring waters in the Lanping-Sima Basin, Yunnan, Southwestern China[J]. *Chemie der Erde*, 2015, 75:287-300.
- [17] 张玉淑,高东林,时林,等. 云南思茅盆地勐腊含盐带盐泉水化学特征与找钾研究[J]. 盐湖研究,2013,21(2):10-17.
- [18] HJ 493-2009,水质采样、样品的保存和管理技术规定[S].
- [19] Tan H. Hydrogen, oxygen, helium and strontium isotopic constraints on the formation of oilfield waters in the western Qaidam Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40:651-660.
- [20] 马万栋,马海州. 塔里木盆地西部卤水地球化学特征及成钾远景预测[J]. 沉积学报,2006,24(1):96-106.
- [21] 伯英,刘成林,焦鹏程,等. 塔里木盆地西南部 and 北部盐泉水化学特征及找钾指标探讨[J]. 地球学报,2013,34(5):594-602.
- [22] 孙大鹏,李秉孝,马育华,等. 青海湖湖水的蒸发实验研究[J]. 盐湖研究,1995,3(2):10-19.
- [23] 高峰,郑绵平. 西藏扎北盐湖夏季卤水自然蒸发实验研究[J]. 盐湖研究,2011,19(4):21-27.
- [24] Chaussidon M, Jambon A. Boron content and isotopic composition of oceanic basalts: geochemical and Cosmochemical implication[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 121(3-4):277-291.
- [25] Harder H. Boron content of sediments as a tool in facies analysis[J]. *Sediment Geol*, 1970, 4:153-175.
- [26] 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):57-60.
- [27] 宋鹤彬,李亚文. 中国南海海水蒸发实验过程中地球化学行径[J]. 地球学报,1994,15(1/2):157-167.
- [28] Wanner C, Bucher K, Philip A E. Pogge von Strandmann, H. Niklaus Waber, Thomas Pettke. On the use of Li isotopes as a proxy for water-rock interaction in fractured crystalline rocks: A case study from the Gotthard rail base tunnel[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 198:396-418.
- [29] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京:科学出版社,1987:32-233.
- [30] Fontes J C, Matray J M. Geochemistry and origin of formation brines from the Pairs Basin, France: 1. Brines associated with Triassic salts[J]. *Chem Geol*, 1993, 109(1-4):149-175.
- [31] Herczeg A L, Torgersen T, Chivas A R, et al. Geochemistry of ground waters from the Great Artesian Basin, Australia[J]. *J Hydrol*, 1991, 126(3/4):225-245.
- [32] Cartwright I, Weaver T R, Fulton S, et al. Hydrogeochemical and isotopic constraints on the origins of dryland salinity, Murray Basin, Victoria, Australia[J]. *Appl Geochem*, 2004, 19(8):1233-1254.
- [33] 王东升. 富钾卤水的找钾指示意义——试论卤钾标志的一般性标准[J]. 物探与化探, 1985, 9(6):452-456.
- [34] 谭红兵, 马万栋, 马海州, 等. 塔里木盆地西部古盐矿点卤水水化学特征与找钾研究[J]. 地球化学, 2004, 33(2):152-158.
- [35] 林耀庭, 何金权, 王田丁, 等. 四川盆地中三叠统成都盐盆富钾卤水地球化学特征及其勘查开发前景研究[J]. 化工矿产地质, 2002, 24(2):72-84.
- [36] 樊启顺, 马海州, 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.
- [37] 时林, 高东林, 张从伟, 等. 地球化学研究方法在钾盐找矿中的应用[J]. 盐湖研究, 2012, 20(1):57-63.
- [38] 许效松, 吴嘉陵. 云南勐野井钾盐矿床特征, 微量元素地球化学及成因探讨[J]. 中国地质科学院院报, 1983 年, 5:17-36, 117-118.
- [39] 漆继红, 许模, 张强, 等. 西藏盐井地区地下热水水化学特征差异分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(3):580-585.

Hydrochemical Characteristics of Salt Spring and Potassium-prospecting in Changdu Basin

QIN Xi-wei, MA Hai-zhou, ZHANG Xi-ying, FAN Qi-shun, CHENG Huai-de ,

LI Yong-shou, MIAO Wei-liang, HAI Qing-yu, SHI Hai-yan

(1. *Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources,*

Qinghai Institute of Salt lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;

2. *Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of Qinghai Province, Xining 810008, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

4. *Geological Survey Bureau of Qinghai Province, Xining, 810001, China)*

Abstract: There is a lot of sulfate, dolomite and magnesite in Changdu Basin of Tibet. It is of great significance to study the formation – potash potential of this area. The authors collected 12 salt spring samples and 2 spring samples during the process of evaporites mines investigation in Changdu Basin. Study results of hydrochemical characteristics show that salt spring samples are mainly about chloride type and Sodium sulfate sub-type, the formation of salt spring waters seem to be attributed to eluviation brine of halite, and these salt spring are also leached by small amounts of carbonate rock and sulfate salt rock. The salt spring samples of Naxi are influenced by deep circulating brine at the same time as well. The degree of salt spring concentration such as Cl, Na and salinity show that the trend of brine concentration in Changdu basin was gradually reduced from north to south, their contents of Br, Li, B was gradually increased from Gongjue to north, and it also increased from Gongjue to south. The salt spring samples has the nature of the inland salt lake in study area. There is a tendency that marine sedimentary environment transition into interior sea sedimentary environment gradually from north to south in Changdu Basin, the northern salt-belt has strong marine characteristics and the southern salt-belt has surface water impact. The studies show that the saliferous formation of Leiwuqi has experienced the most intense evaporation, concentration and eluviation, the stage of brine concentration in Leiwuqi Salt-belt was previous to the Naxi and Gongjue Salt-belt, and the ore-forming environment in the Leiwuqi Salt-belt is better than the Naxi and Gongjue Salt-belt. The Gongjue area can be considered to be one of the most promising areas in search for potash ore. The salt spring samples of Naxi and Gongjue was influenced by land surface waters. All of these evidences suggest that the potassium-forming prospect of Nangqian-Changdu-Lanping Basin became gradually better from north to south.

Key words: Changdu Basin; Potassium-prospecting; Salt spring; Hydrochemical characteristics of salt spring; Hydrochemical coefficient