

察尔汗盐湖晒卤过程中铷和铯元素富集规律研究

王超^{1,2}, 孙小虹^{1,2}, 丁晓姜^{1,2}, 周友连^{1,2}, 王淑丽^{1,2}, 王凡^{1,2},
马骏辉¹, 刘万平²

(1. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101; 2. 青海盐湖工业股份有限公司, 青海 格尔木 816000)

摘要: 通过对察尔汗盐湖 I、II 号采区盐田中卤水及固体进行系统采样和分析, 发现卤水中的主微量元素在盐田摊晒过程中显示出不同程度的富集, 除成盐外, 还存在类质同象、母液夹带等现象。其中, 铷和铯元素的富集规律与光卤石析出存在一定的关联。XRD 和 TOF-SIMS 分析结果显示, 铷与钾呈现出更强的正相关性, 与钠呈现出负相关性, 表明铷元素与钾元素存在类质同象现象。铯元素与钾元素的类质同象现象则不明显, 可能主要通过母液夹带的方式进入盐样中。该研究揭示了卤水中铷和铯元素的富集规律和赋存形式, 对盐湖铷和铯资源综合利用开发具有一定的借鉴意义。

关键词: 察尔汗盐湖; 光卤石; 铷; 铯; 类质同象

中图分类号: P618.7; P619.21⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)05-0701-10

Research on the enrichment regularity of rubidium and cesium in Qarhan Salt Lake

WANG Chao¹, SUN Xiao-hong^{1,2}, DING Xiao-jiang^{1,2}, ZHOU You-lian^{1,2}, WANG Shu-li^{1,2}, WANG Fan^{1,2},
MA Jun-hui¹ and LIU Wan-ping²

(1. Geology Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100101, China; 2. Qinghai Salt Lake Industry Co., Ltd., Golmud 816000, China)

Abstract: Through systematic sampling and analysis of brine and solids in the salt fields of mining areas I and II of Qarhan Salt Lake, it is found that the main and trace elements in the brine show different degrees of enrichment in the process of spreading in the salt fields. In addition to salt formation, there are also isomorphism, mother liquor entrainment and other phenomena. Among them, the enrichment rule of rubidium and cesium elements is related to the precipitation of carnallite. The XRD and TOF-SIMS analysis results show that rubidium exhibits a stronger positive correlation with potassium and a negative correlation with sodium, indicating the existence of isomorphism between rubidium and potassium elements. The phenomenon of isomorphism between cesium and potassium elements is not obvious, and it may mainly enter the salt sample through mother liquor entrainment. This research reveals the enrichment patterns and occurrence forms of rubidium and cesium elements in brine, which has certain reference significance for the comprehensive utilization and development of rubidium and cesium resources in salt lakes.

Key words: Qarhan Salt Lake; carnallite; rubidium; cesium; isomorphism

Fund support: Qinghai Provincial Science and Technology Plan Project (2021-ZJ-773); Science and Technology

收稿日期: 2023-06-18; 接受日期: 2023-08-08; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 青海省科技计划项目(2021-ZJ-773); 中煤总局科技创新项目(ZMKJ-2022-J01-3); 化工地质科技项目(ZHDK202102)

作者简介: 王超(1994-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为盐湖卤水资源开发利用研究, E-mail: neuwc5211@163.com; 通讯作者: 孙小虹(1983-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为盐湖矿产资源勘查及开发利用研究, E-mail: sxhbei@163.com。

Innovation Project of China Coal Geology Administration (ZMKJ-2022-J01-3); Chemical Geological Technology Project (ZHDK 202102)

柴达木盆地是我国海拔最高的内陆盆地,盆地内富有铁、锡、钾、镁、硼、锂等多种矿产资源,故有“聚宝盆”的美誉(武丽平等, 2022)。近年来,我国粮食能源资源供需环境和安全环境发生了重大变化,为增强我国对战略性矿产资源供应保障能力,必须加速开展新一轮的找矿突破战略行动,确保我国的粮食和能源等各方面安全(田郁溟等, 2022; 王安建等, 2022)。

铷铯资源是重要的战略性矿产资源之一,随着近年来人类科学技术的发展,对铷铯资源的开发和应用也不断深入,铷已广泛应用于电子器件、玻璃、光电管、离子推进发动机和生物医药等领域;与铷同族的铯元素,主要应用于信息产业、医药、光学晶体及航天等领域,其中铯原子钟是世界上精确度最高的时钟(胡仙峰, 2007; 刘海宁等, 2019; 王盼盼等, 2021)。我国铷铯资源分布广泛,其中铷主要赋存于锂云母及盐湖卤水中,铯主要赋存于铯榴石等固体矿物中,或以离子态赋存于盐湖卤水中(史振, 2019; 何艳君, 2022; 高芯蕊等, 2023)。现阶段铷铯资源的利用主要为集中开采固体矿物,然而,自从我国可可托海3号矿关闭以来,铯榴石等矿物原料供应大幅减少,导致我国铷铯资源对外依存度大幅提升。因此,加强对盐湖卤水中的离子态铷铯资源利用显得尤为重要(Li *et al.*, 2017; 张建锋, 2018; Xing *et al.*, 2021)。

盐湖卤水中不仅蕴含丰富的钾、钠、镁等元素,其中的铷、铯储量经勘查也颇为可观,目前,柴达木盆地中分布着察尔汗、大柴旦、东西台吉乃尔等各类氯化物型、硫酸盐型及碳酸盐型盐湖共计25个(陈文祥等, 2022; 马珍, 2022; 白燕祥等, 2023)。其中,察尔汗盐湖面积广阔,是我国探明储量最大的钾镁锂盐矿,由于存在着资源总量丰富但含量低、共伴生离子种类复杂、难以提取或提取成本过高等问题,因而察尔汗盐湖的资源利用仅仅体现在钾盐及镁盐的开采、卤水提锂等产业(乜贞等, 2022)。通过勘探调查,除钾镁钠盐资源以外,察尔汗盐湖还蕴藏着约1024万吨的锂盐资源、769万吨的硼矿资源、4.3亿吨的铷矿资源、50.7亿吨的溴资源、3.47亿吨的碘资源(张苏江等, 2022)。因此,总结归纳铷铯等微量元素在盐湖摊晒过程中的分布规律,加强盐湖

稀散元素综合利用基础研究,是实现矿业公司降本增效、转型升级并提高企业核心竞争力的必然选择与重要途径。

1 研究方法

1.1 样品及取样方法

实验样品采自察尔汗盐湖 I、II 采区盐田摊晒区域,共计53块盐田,其中钠盐池29块,调节池4块,光卤石池20块,并采取 I、II 采区原始卤水样品各1件。每块盐田采集固体及卤水样品各3件,合计采集159件固相及161件卤水样品,分别对其进行化验分析。

取固相样品时,采集液面以下的新结晶样品,采集后尽量使固液两相分离,进行封装前以滤纸吸干固相表面水分。卤水样采集过程中用卤水对取样瓶清洗3遍,取样并使取样容器溢满密封保存,避免污染,用蜡对取样瓶封口,粘贴标签后装箱。固体样对应卤水样的采样环节和位置,避免样品污染,用塑料自封袋进行封装,粘贴标签密封后装箱。每个固相化学分析样品采集200g,卤水采集1L。

1.2 样品检测方法

(1) 固体及卤水样品化学元素分析测试及 X 射线衍射分析由中化地质矿山总局中心实验室承担, TOF-SIMS(飞行时间二次离子质谱仪)由清华大学分析测试中心承担。

(2) 对卤水样品采用电感耦合等离子体发射光谱法测定 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度;电感耦合等离子质谱法测定 Li^+ 、 Rb^+ 、 Cs^+ 、 Sr^{2+} 浓度;阳离子交换树脂处理后电感耦合等离子质谱测定 Br^- 、 I^- 、 B_2O_3 浓度;容量法测定 Cl^- 浓度。

(3) 固相样品的测试方法:采用电感耦合等离子体光谱法测定 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量;电感耦合等离子质谱法测定 Li^+ 、 Rb^+ 、 Cs^+ 、 Sr^{2+} 含量;阳离子交换树脂处理后电感耦合等离子质谱测定 Br^- 、 I^- 、 B_2O_3 含量;采用容量法滴定 Cl^- 含量。

(4) TOF-SIMS 分析测试设备为德国 ION-TOF GmbH 公司生产的 TOF. SIMS 5-100。测试条件为一次离子束: Bi1, 30 keV, 45 deg 入射, 扫描面积: $300\ \mu m \times 300\ \mu m$; 二次离子极性和质量范围: 正离

子,0~900 amu;溅射离子束: O₂⁺,1 keV,45 deg 入射,溅射速度相对标准物质 SiO₂ 为 0.205 nm/s。

2 实验结果及分析

2.1 原始卤水成分分析

察尔汗盐湖 I、II 采区原始卤水成分分析如表 1

所示。由表 1 可知,原始卤水矿化度均在 320 g/L 左右,均是富钾、镁、钠而贫钙、硫酸根的工业卤水。受空间区位分布差异及固液转换开采工艺所使用的溶剂差异影响(李瑞琴等,2021),不同采区原卤之间在 K⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻ 等质量浓度上存在差异。

2.2 钾、钠、镁、氯元素富集规律

对固相及对应卤水两相中的 K⁺、Na⁺、Mg²⁺ 和 Cl⁻

表 1 I 采区和 II 采区原始卤水成分分析结果

Table 1 Analysis of original brine composition in mining area I and II

项目	c _B /(g·L ⁻¹)							
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Li ⁺	B ₂ O ₃
I 采区	8.12	8.12	0.45	52.89	213.52	11.12	0.178	0.577
II 采区	10.84	39.77	0.98	50.20	215.03	4.56	0.091	0.368

项目	c _B /(g·L ⁻¹)				矿化度/(g·L ⁻¹)	pH	
	Rb ⁺	Sr ²⁺	Cs ⁺	Br ⁻			
I 采区	0.004	0.016	0.12×10 ⁻³	0.019	0.26×10 ⁻³	325.165	8.65
II 采区	0.003	0.030	0.32×10 ⁻⁴	0.017	0.13×10 ⁻³	322.296	8.71

含量或浓度,按照钠盐池→钠调节池→光卤石调节池→光卤石池的卤水走向(图 1)及盐田摊晒分布规律绘图并进行分析,结果见图 2~图 5。

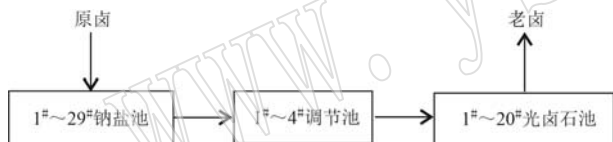


图 1 卤水走向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bittern routing

由图 2 可知,按照盐田卤水走向,经晒卤石盐大量析出后,原卤中的 K⁺ 浓度 8 000~11 000 mg/L 在钠调节池中达到 13 000 mg/L;经光卤石池析出大量光卤石后,K⁺ 浓度急剧下降。在 20# 光卤石池(卤水走向末端,下同)测得卤水中 K⁺ 浓度为 602.4 mg/L,元素析出率达到了 92.5%~94.5%(图 2a)。钠盐池的固体盐样中 K⁺ 含量为 0.1%~0.3%,经钠调节池→光卤石调节池→光卤石池晒盐析出光卤石后,K⁺

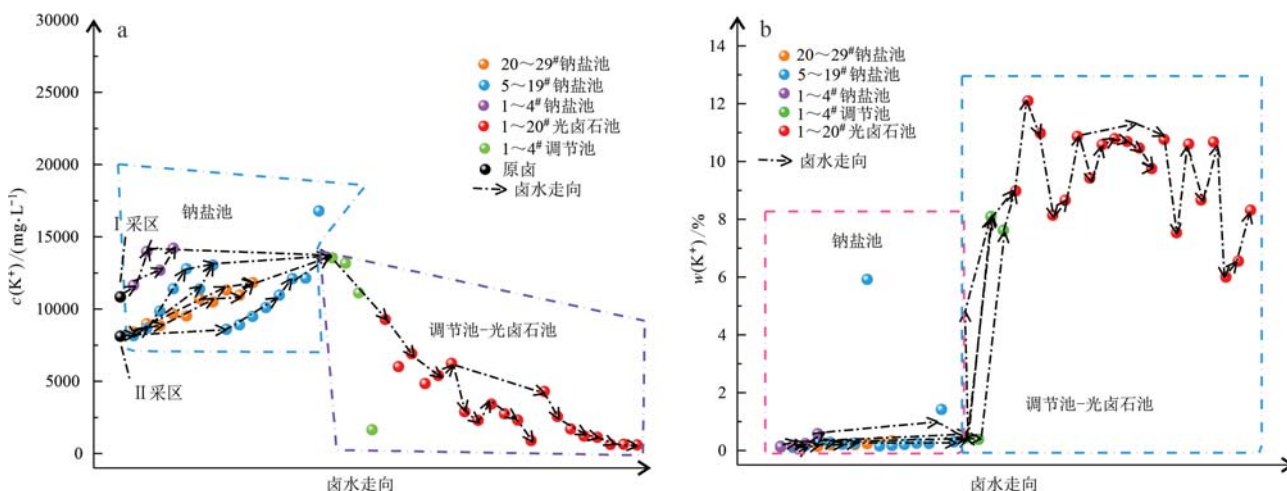


图 2 液相中 K⁺ 浓度(a)和固相中 K⁺ 含量(b)随卤水走向变化趋势

Fig. 2 Variation trend of K⁺ concentration in the liquid phase (a) and K⁺ content in solid phase (b) with the trend of bittern

含量急剧上升,光卤石池的盐样中 K^+ 含量均 $>6\%$, 最高为 12.10% , 元素富集比达到了钠盐池盐样中 K^+ 含量的 $20\sim 120$ 倍(图 2b)。

由图 3 可知,原卤中的 Na^+ 浓度为 $37\ 000\sim 40\ 000\text{ mg/L}$, 按照卤水走向,因石盐大量且持续地析出,卤水中 Na^+ 浓度快速下降,在 $20^{\#}$ 光卤石池测

得卤水中 Na^+ 浓度为 $1\ 756.6\text{ mg/L}$, 元素析出率达到了 95% 左右(图 3a)。原卤入口处钠盐池的盐样中 Na^+ 含量为 $37\%\sim 38\%$, 按照卤水走向,经摊晒析出后, Na^+ 含量急剧下降,在光卤石调节池和光卤石池中测得盐样中 Na^+ 含量大多在 $2\%\sim 17\%$ 之间(图 3b), 这说明卤水中的大部分 Na^+ 在钠盐池中形成了

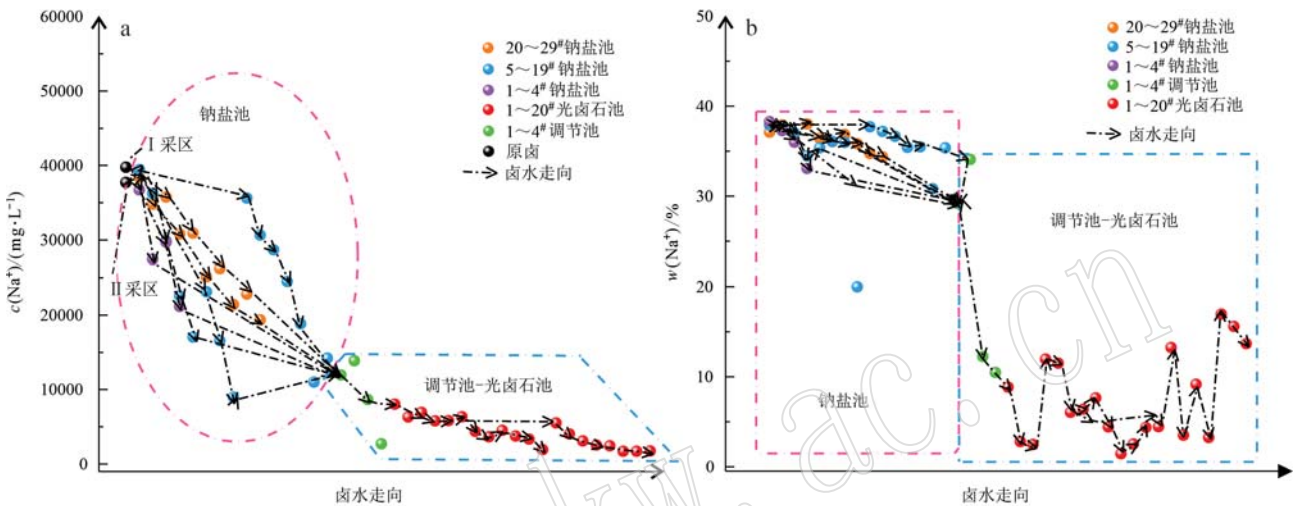


图 3 液相中 Na^+ 浓度(a)和固相中 Na^+ 含量(b)随卤水走向变化趋势

Fig. 3 Variation trend of Na^+ concentration in the liquid phase (a) and Na^+ content in solid phase (b) with the trend of bittern

石盐,在光卤石池的石盐含量要少于钠盐池。

由图 4 可知,原卤中的 Mg^{2+} 浓度为 $50\ 000\sim 53\ 000\text{ mg/L}$, 按照卤水走向,卤水中 Mg^{2+} 浓度富集程度较大,在 $20^{\#}$ 光卤石池测得卤水中 Mg^{2+} 浓度为 $122\ 557\text{ mg/L}$, 元素富集比达到了 $2.31\sim 2.45$ 倍(图 4a)。原卤入口处钠盐池的盐样中 Mg^{2+} 含量为 $0.5\%\sim 0.7\%$, 按照卤水走向,经晒盐析出后, Mg^{2+} 含量快

速上升,在光卤石调节池和光卤石池中测得盐样中 Mg^{2+} 含量大部分在 $6\%\sim 9\%$ 之间(图 4b), 盐样中 Mg^{2+} 含量的剧增,可能是卤水中的 Mg^{2+} 大部分在光卤石池中蒸发浓缩析出光卤石或少量的水氯镁石。

由图 5 可知,原卤中的 Cl^- 浓度为 $210\ 000\sim 220\ 000\text{ mg/L}$, 按照卤水走向,卤水中 Cl^- 浓度得到富集,在 $20^{\#}$ 光卤石池测得卤水中 Cl^- 浓度为 $329\ 355\text{ mg/L}$,

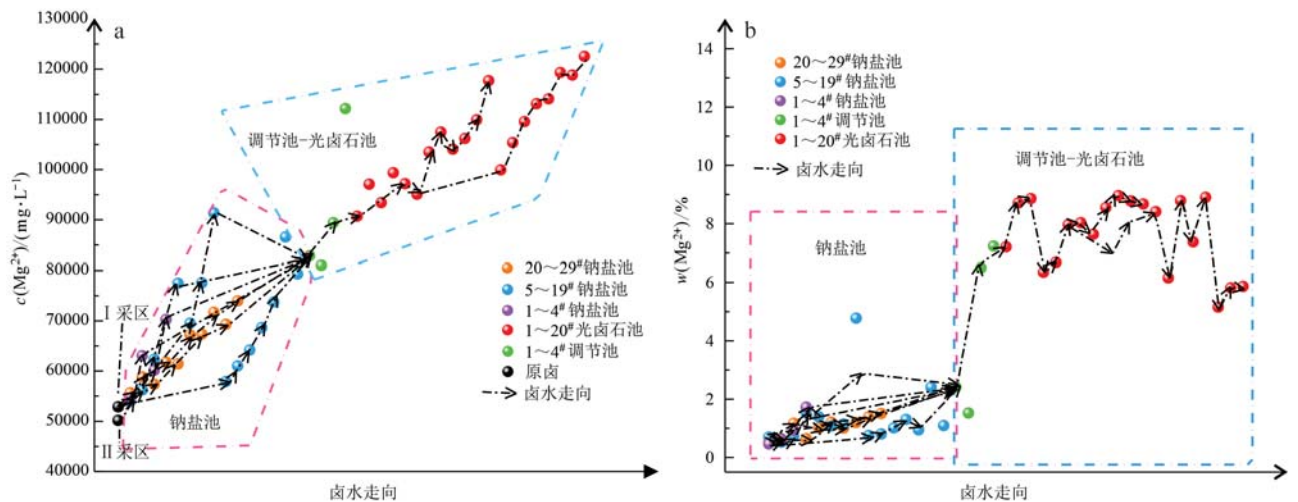


图 4 液相中 Mg^{2+} 浓度(a)和固相中 Mg^{2+} 含量(b)随卤水走向变化趋势

Fig. 4 Variation trend of Mg^{2+} concentration in the liquid phase (a) and Mg^{2+} content in solid phase (b) with the trend of bittern

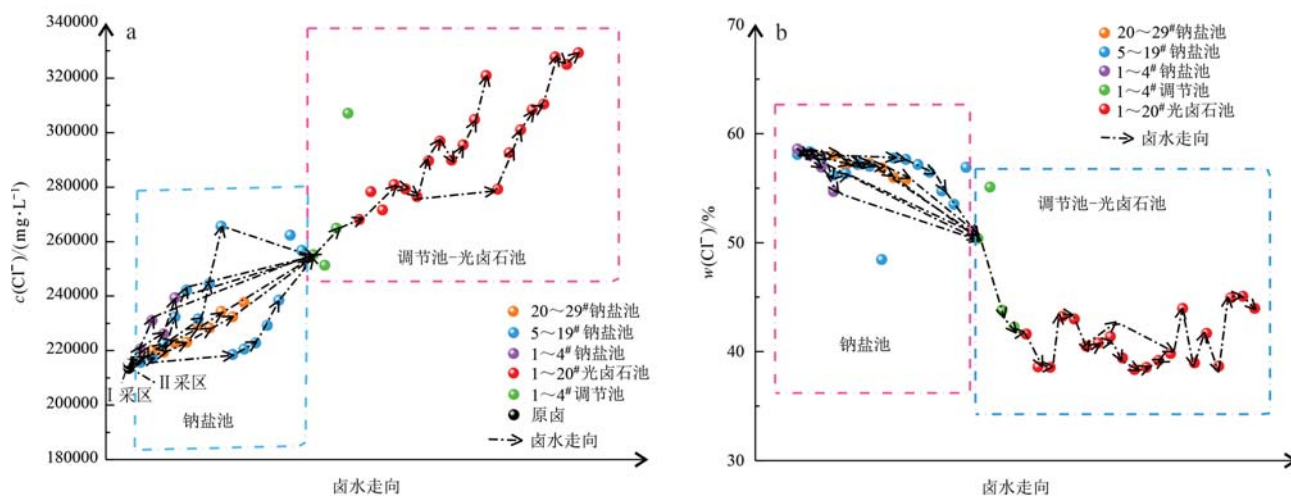


图5 液相中Cl⁻浓度(a)和固相中Cl⁻含量(b)随卤水走向变化趋势

Fig. 5 Variation trend of Cl⁻ concentration in the liquid phase (a) and Cl⁻ content in solid phase (b) with the trend of bittern

元素富集比达到了1.5~1.57倍(图5a)。原卤入口处钠盐池的盐样中Cl⁻含量为58%左右,经摊晒后Cl⁻含量有所下降,在光卤石调节池和光卤石池中测得盐样中Cl⁻含量大部分在38%~45%之间(图5b),这是因为Cl⁻大部分可能在光卤石池中富集形成了光卤石或水氯镁石,KCl·MgCl₂·6H₂O、MgCl₂·6H₂O中元素含量占比较低。

2.3 铷和铯元素富集规律

对固液两相中Rb⁺和Cs⁺的含量和浓度,按照卤水走向及盐田摊晒分布规律分别绘图并进行分析,

结果见图6、图7。

由图6可知,原卤中的Rb⁺浓度为2.8~3.8 mg/L,按照卤水走向,因石盐大量析出,卤水中Rb⁺浓度达到了5.95 mg/L,富集比为1.56~2.13倍。之后,浓度呈下降的趋势,在20[#]光卤石池中测得卤水中Rb⁺浓度为0.05 mg/L,达到最小值,元素析出率相较于原卤达到了98%左右(图6a)。原卤入口处钠盐池的盐样中Rb⁺含量为0.4×10⁻⁶~0.6×10⁻⁶,按照卤水走向,经过钠盐池→钠调节池→光卤石调节池→光卤石池晒盐析出后,Rb⁺呈现出先上升后下降的趋

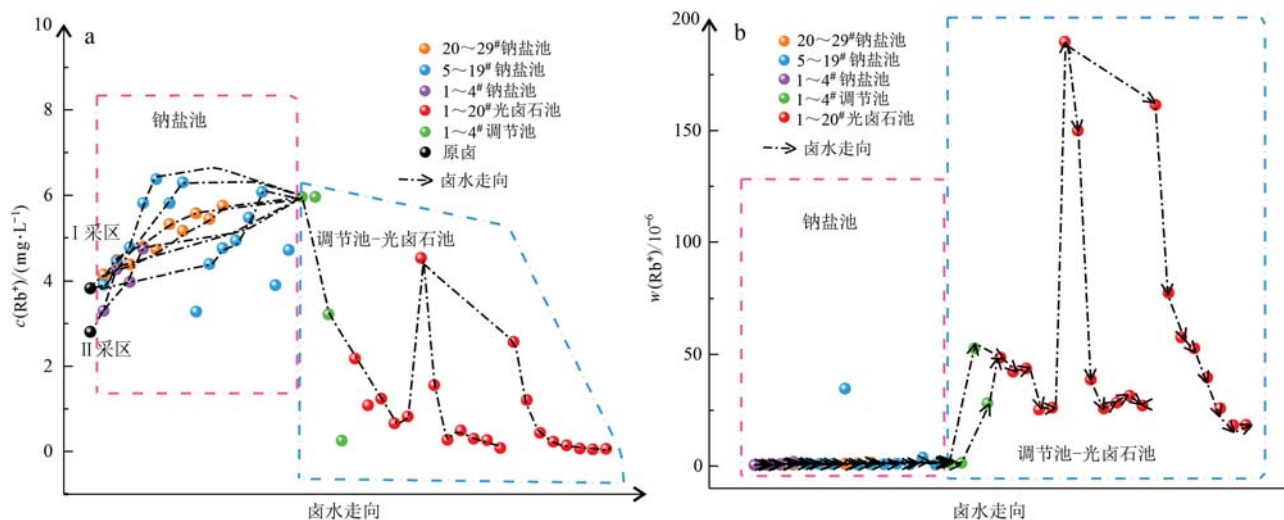


图6 液相中Rb⁺浓度(a)和固相中Rb⁺含量(b)随卤水走向变化趋势

Fig. 6 Variation trend of Rb⁺ concentration in the liquid phase (a) and Rb⁺ content in solid phase (b) with the trend of bittern

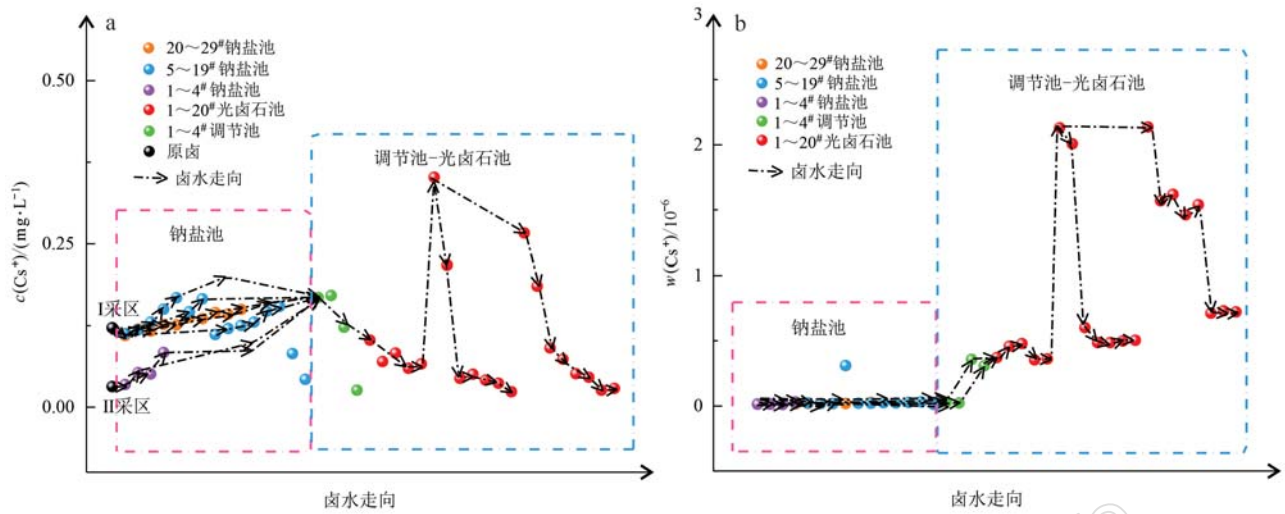


图7 液相中 Cs^+ 浓度(a)和固相中 Cs^+ 含量(b)随卤水走向变化趋势

Fig. 7 Variation trend of Cs^+ concentration in the liquid phase (a) and Cs^+ content in solid phase (b) with the trend of bittern

势,由图6b可知, Rb^+ 含量变化较大。在6[#]、7[#]和13[#]光卤石池中测得的 Rb^+ 含量均 $>150 \times 10^{-6}$ 。光卤石池和调节池中测得盐样中 Rb^+ 含量大多位于 $18 \times 10^{-6} \sim 77 \times 10^{-6}$ 范围内,富集倍数可达30~193倍。

由图7可知,原卤中的 Cs^+ 浓度为0.03~0.12 mg/L,按照卤水走向,卤水中 Cs^+ 浓度整体上几乎无变化,和 Rb^+ 类似,局部在6[#]光卤石池测得卤水中 Cs^+ 浓度为0.35 mg/L左右,达到最大值,其他盐田中 Cs^+ 浓度变化均 <0.3 mg/L,6[#]光卤石池中 Cs^+ 富集比相较于原卤达到了2.92~11.67倍,整体上含量很小(图7a)。原卤入口处钠盐池的盐样中 Cs^+ 含量为 0.01×10^{-6} 左右,按照卤水走向,经过钠盐池→钠调节池→光卤石调节池→光卤石池晒盐析出后, Cs^+ 含量急剧上升,与 Rb^+ 变化趋势相似,主要在光卤石池中 Cs^+ 含量有所富集,在光卤石池中测得盐样中 Cs^+ 含量最高可达 $2 \mu\text{g/g}$,富集倍数可达200倍(图7b)。

2.4 铷和铯的赋存形式

对于卤水中铷和铯元素的去向,各科研院所研究方法不一,其中铷的研究较多。高丹丹等(2022)认为,钾光卤石基固溶体是控制卤水中微量铷进入固相的关键产物,钾光卤石的形成会导致卤水中铷的含量迅速下降。李瑞琴等(2014)在研究过程中发现,铷的流失主要是由于铷和钾的类质同象造成的,其次为包裹体和母液夹带现象。

本文对察尔汗盐湖析盐过程中的元素富集规律进行了较为全面的总结,发现铷元素进入固相的确

与光卤石形成存在一定的关联性,推测铷与钾之间存在类质同象行为。对于类质同象现象如何界定,谢俊(2020)运用XAFS和XRD精修从原子层次证实了稀土在氟磷灰石中的类质同象取代。肖喆等(2019)通过MLA、能谱分析推断出铬元素以类质同象形式存在于矿物中。段凯波等(2014)通过全元素分析、岩矿鉴定及选矿实验等,结合近年来研究,推断出织金磷块岩矿床中伴生的稀土元素主要以类质同象进入胶磷矿中,稀土分量与磷含量存在一定的正相关性。梁述廷等(2015)运用X射线荧光光谱微区分析、谱线重叠干扰等解决了互为类质同象的鉴定难题。TOF-SIMS(飞行二次时间质谱)具有高灵敏度、低检测限、高分析精度等特点(王梦琴等,2023)。为准确研究卤水中低浓度的铷析出行为,对6[#]光卤石池固相样品进行了XRD分析及TOF-SIMS分析。化学多元素分析结果显示,6[#]光卤石池固相样品中 K^+ 含量为10.87%, Na^+ 含量为6.06%, Mg^{2+} 含量为7.97%, Cl^- 含量为40.50%, Rb^+ 含量为 189.76×10^{-6} , Cs^+ 含量为 2.13×10^{-6} 。XRD分析结果如图8所示,TOF-SIMS溅射前后分析结果如图9和图10所示。TOF-SIMS溅射采用的是双离子束分析,其中1个离子束对样品表面刻蚀产生微小的溅射凹坑,第2个离子束对溅射坑底部进行分析,也称为深度分析。溅射不仅可去除样品表面污染物的影响,也可获得更高分辨率图像及样品内部各元素的分布情况。

由图8可知,6[#]光卤石池固相样品中以光卤石

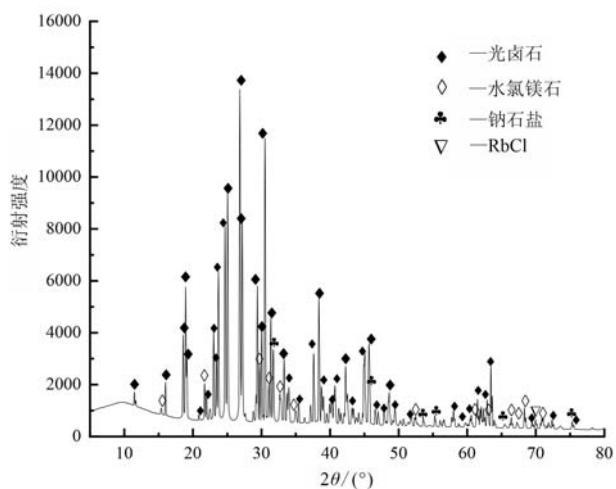


图 8 6#光卤石池固相样品 XRD 谱图

Fig. 8 XRD spectra of solid sample of 6# carnallite salt field

为主,其次为水氯镁石、石盐,这与化学多元素分析结果一致。

由图 9、10 可知,钾元素与钠元素呈现镶嵌式分布;将铷元素分别与钾、钠元素进行堆叠,发现铷元素与钾元素呈现出较强的正相关性,钾和铷的分布以散点均一分布为主,局部有条带状及絮团状分布,分布区域基本相同,堆叠密度较高;而铷元素与钠元素则表现为较强的负相关性,堆叠密度较小,分布区域相差较大。溅射后与溅射前所得结论基本一致,这说明铷对钾的取代不仅仅是矿物表面的母液残留,矿物内部也存在此类现象,据此可推测铷与钾在结晶析出时,可能是以类质同象现象居多,非母液夹带现象,但不排除存在包裹体现象。溅射前后铷元素与钾、钠元素分布规律均不相同,无法判断铷元素在矿物内部与表面和钾元素是否存在类质同象现

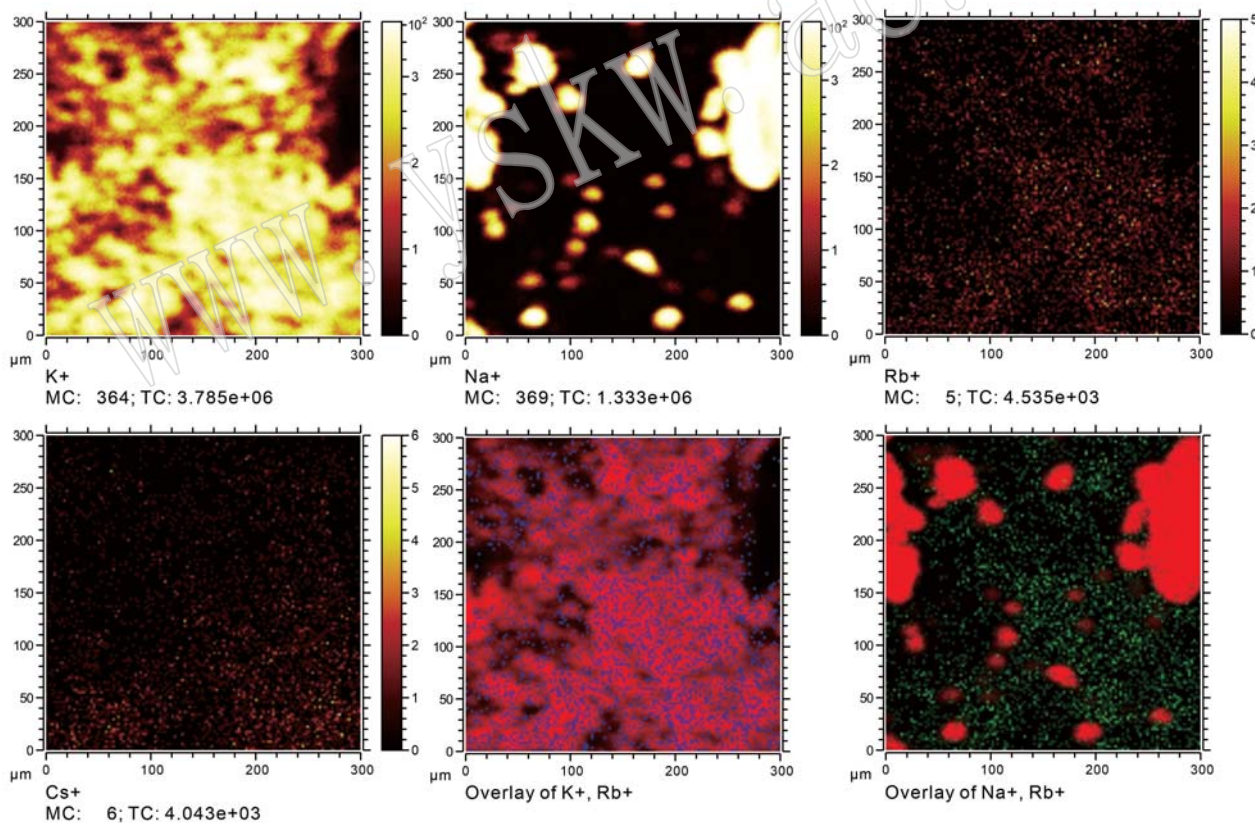


图 9 TOF-SIMS 分析面扫图(溅射前)

Fig. 9 Surface scan of TOF-SIMS analysis (before sputtering)

K^+ 与 Rb^+ 叠加图中粉红色为 K^+ ; 蓝色为 Rb^+ ; Na^+ 与 Rb^+ 叠加图中红色为 Na^+ ; 绿色为 Rb^+

in the overlay map of K^+ and Rb^+ , pink represents K^+ and blue represents Rb^+ ; in the overlay map of Na^+ and Rb^+ , red represents Na^+ and green represents Rb^+

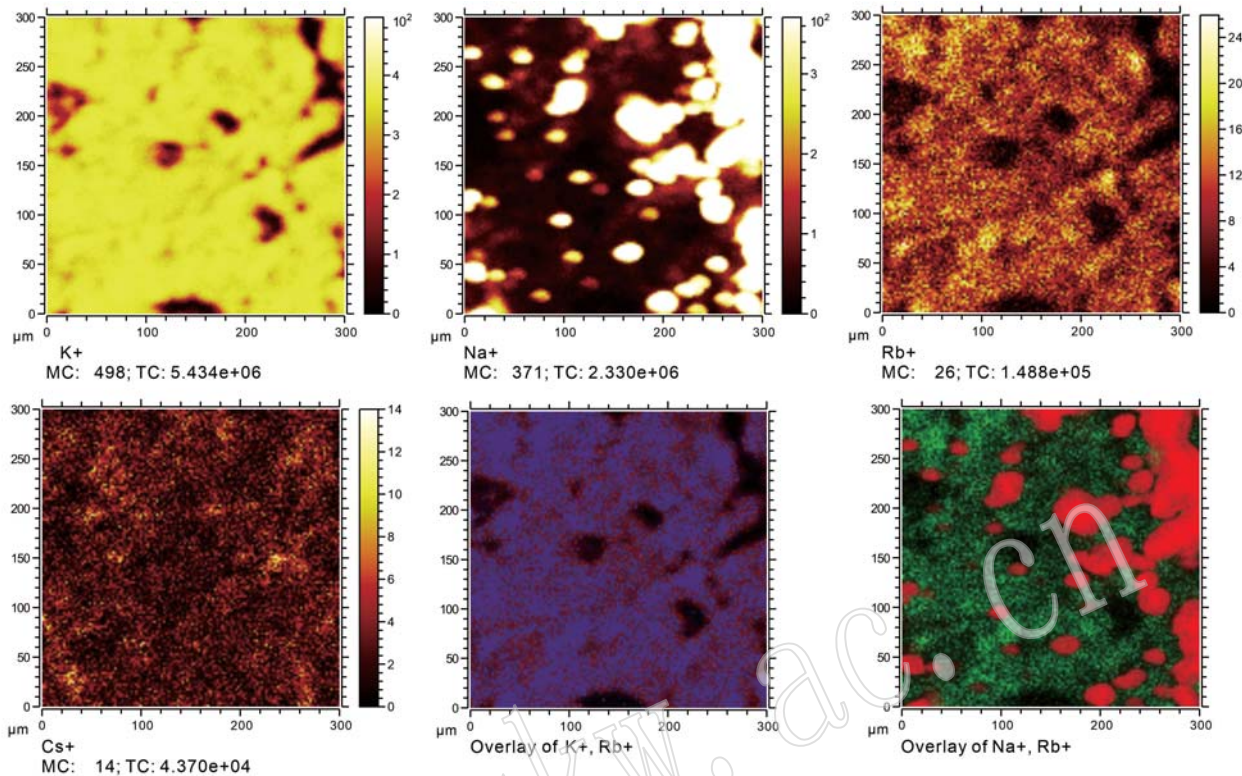


图 10 TOF-SIMS 分析面扫图(溅射后)

Fig. 10 Surface scan of TOF-SIMS analysis (after sputtering)

K^+ 与 Rb^+ 叠加图中紫色为 K^+ ; 红色为 Rb^+ ; Na^+ 与 Rb^+ 叠加图中红色为 Na^+ ; 绿色为 Rb^+

in the overlay map of K^+ and Rb^+ , purple represents K^+ and red represents Rb^+ ; in the overlay map of Na^+ and Rb^+ , red represents Na^+ and green represents Rb^+

象,需结合更多检测进行深入研究。

3 结论

(1) 察尔汗盐田系统中的盐样分析结果显示矿物析出顺序主要为石盐→光卤石→水氯镁石(少量)。 K^+ 和 Rb^+ 浓度按照卤水走向呈现出先上升后下降的趋势, Cl^- 、 Mg^{2+} 整体上都呈现出上升趋势, Cs^+ 浓度则相对平稳, Na^+ 按照卤水走向呈现下降趋势。盐样中 Cs^+ 和 Rb^+ 浓度按照卤水走向呈现出先上升后下降的趋势, K^+ 、 Mg^{2+} 整体上都呈现出上升趋势, Na^+ 和 Cl^- 按照卤水走向呈现下降趋势。结合卤水中各元素的富集规律,可对盐田现有生产工艺进行合理评价,对调整盐田卤水摊晒路线具有重大意义。

(2) 察尔汗盐湖晒卤过程中卤水中的 Cs^+ 和 Rb^+ 浓度变化与 K^+ 存在一定关联, Cs 和 Rb 元素的析出,或存在夹带、包裹体和类质同象等现象中的一种或多种,或通过卤水中的阴离子成盐导致固相

中含量变化, Rb 随光卤石进入固相中可能以类质同象现象为主,后续应当在不影响钾光卤石形成的情况下,对钾和铷高效分离进行重点研究, Cs 在固相中的赋存形式仍有待进一步研究。

(3) 察尔汗盐湖原卤中铷和铯元素含量较低,低于盐类伴生矿产综合评价指标《DZ/T 0212. 2-2020》中所制定标准,在当前开采技术条件下不具备经济性,不建议原卤中直接提取铷和铯。如采用经济性较高的新工艺,可考虑在卤水进入调节池阶段切入适当的工艺将铷进行分离,以降低铷的流失。另外,此次调查取样结果存在一定局限性,若进行全年长观统计,或将得到更全面的数据,为盐湖资源综合利用设计方案提供更为科学的研究基础。

References

- Bai Yanxiang, Wang Songbo, Guo Shuang, *et al.* 2023. Utilization and research status of salt lake resources in Qaidam Basin, Qinghai[J].

- Journal of Salt Science and Chemical Industry, 52 (3): 1~6, 19(in Chinese with English abstract).
- Chen Wenxiang, Zhang Qiang, Zhao Xiaogang, *et al.* 2022. Discussion on utilization of potassium resources in Qarhan salt lake[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 51 (8): 50~54(in Chinese with English abstract).
- Duan Kaibo, Wang Denghong, Xiong Xianxiao, *et al.* 2014. A review of a preliminary quantitative study and genetic analysis for rare earth elements of ionic adsorption state in phosphate ore deposit in Zhijin, Guizhou Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 33 (1): 118~125(in Chinese with English abstract).
- Gao Dandan, Li Dongdong, Fan Yanfei, *et al.* 2022. Economically utilization of the rubidium resources in Qarhan salt lake: From fundamental study to technology innovation[J]. Journal of Salt Lake Research, 30(3): 1~11, 41 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xinrui, Jia Hongxiang, Li Tianjiao, *et al.* 2023. Perspective of rubidium and caesium resource demand in China [J]. Journal of the Earth, 44 (2): 279~285(in Chinese with English abstract).
- He Yanjun. 2022. Overview of the extraction process of rubidium and cesium in brine[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 45 (5): 14~15(in Chinese with English abstract).
- Hu Xianfeng. 2007. Thinking on the development direction of mineral resources in Qarhan salt lake of Qinghai—Comprehensive development of potassium, lithium and magnesium, and development of deep-processing products of salt lakes with high added value[J]. Friend of Chemical Industry, (13): 29~30 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruiqin, Chen Xia, Liu Chenglin, *et al.* 2014. Study on loss mechanism of rubidium during potassium crystallization from potassium-rich brine of Jiangling sunken area[J]. Inorganic Chemicals Industry, 46 (2): 18~20, 6(in Chinese with English abstract).
- Li Ruiqin, Liu Chenglin, Zhao Yanjun, *et al.* 2021. Influence of sedimentary characteristics on water solution mining of low-grade potassium ore: A case study of holocene in the northern ore section of Mahai salt lake, Qaidam Basin [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 40 (1): 76~88(in Chinese with English abstract).
- Li Z, Pranolo Y, Zhu Z, *et al.* 2017. Solvent extraction of cesium and rubidium from brine solutions using 4-tert-butyl-2-(α -methylbenzyl)-phenol[J]. Hydrometallurgy, 171: 1~7.
- Liang Shuting, Liu Yuchun, Liu Tian, *et al.* 2015. Application of in-situ Micro-XRF spectrometry in the identification of copper minerals[J]. Rock and Mineral Analysis, 34(2): 201~206(in Chinese with English abstract).
- Liu Haining, Ye Xiushen, Zhang Huifang, *et al.* 2019. Separation and extraction of rare elements in salt lake brine[J]. Journal of Salt Lake Research, 27 (3): 11~20(in Chinese with English abstract).
- Ma Zhen. 2022. Research progress on efficient separation and extraction technology of lithium resources in salt lakes[J]. Inorganic Chemicals Industry, 54(10): 22~29 (in Chinese with English abstract).
- Nie Zhen, Wu Qian, Ding Tao, *et al.* 2022. Research progress on industrialization technology of lithium extraction from salt lake brine in China[J]. Inorganic Chemicals Industry, 54(10): 1~12(in Chinese with English abstract).
- Shi Zhen. 2019. Extraction Technology of Rubidium and Cesium from Brine[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- Tian Yuming, Ju Yitai and Zhou Shangguo. 2022. Thinking on several problems of China's strategic mineral resources security guarantee[J]. Geology and Exploration, 58(1): 217~228(in Chinese with English abstract).
- Wang Anjian and Yuan Xiaojing. 2022. Security of China's strategic and critical minerals under background of great power competition[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 37(11): 1 550~1 559(in Chinese with English abstract).
- Wang Mengqin, Cai Keda and Li Zhanping. 2023. Application of time-of-flight secondary ion mass spectrometry (TOF-SIMS) in the study of mineral inclusions[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 42(3): 451~464(in Chinese with English abstract).
- Wang Panpan, Liu Lijun, Zhao Yun. 2021. Research progress in the separation and extraction of rubidium, cesium, boron, and lithium in brine[J]. Chemical Engineering Management, (3): 45~49(in Chinese with English abstract).
- Wu Liping, Yuan Hongzhan and Jin Fang. 2022. Study on natural evaporation experimental of deep brine in Yahu structure[J]. Inorganic Chemicals Industry, 54 (11): 71~78 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Zhe, Chen Guifang, Pang Jiantao, *et al.* 2019. Analysis of the occurrence state of Cr in phosphate rock of Kunyang phosphate mine [J]. Industrial Minerals & Processing, 48(7): 36~39(in Chinese with English abstract).
- Xie Jun. 2020. Research on the Isomorphism Mechanism of Rare Earths in Zhijin Phosphorite in Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University (in Chinese with English abstract).
- Xing P, Wang C, Chen Y, *et al.* 2021. Rubidium extraction from mineral and brine resources: A review [J]. Hydrometallurgy, 203: 105644.

- Zhang Jianfeng. 2018. Effective Extraction of Cesium and Rubidium from Salt Lake Brine[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese with English abstract).
- Zhang Sujiang, Zhang Lin, Jiang Ailing, *et al.* 2022. Current situation and development suggestions of development and utilization of salt lake resources in China[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 54(10): 13~21 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 白燕祥, 王松博, 国爽, 等. 2023. 青海柴达木盆地盐湖资源元素利用及研究现状[J]. *盐科学与化工*, 52(3): 1~6, 19.
- 陈文祥, 张强, 赵小刚, 等. 2022. 察尔汗盐湖钾矿资源利用探讨[J]. *盐科学与化工*, 51(8): 50~54.
- 段凯波, 王登红, 熊先孝, 等. 2014. 贵州织金磷矿床中离子吸附型稀土的存在及初步定量[J]. *岩矿测试*, 33(1): 118~125.
- 高丹丹, 李东东, 樊燕飞, 等. 2022. 察尔汗盐湖铷资源利用——从基础认知到技术创新[J]. *盐湖研究*, 30(3): 1~11, 41.
- 高蕊蕊, 贾宏翔, 李天骄, 等. 2023. 中国铷资源需求展望[J]. *地球学报*, 44(2): 279~285.
- 何艳君. 2022. 卤水中铷铯提取的工艺综述[J]. *新疆有色金属*, 45(5): 14~15.
- 胡仙峰. 2007. 青海察尔汗盐湖矿产资源的开发方向思考——钾、硼、锂、镁综合开发、高附加值的盐湖深加工产品开发[J]. *化工之友*, (13): 29~30.
- 李瑞琴, 陈侠, 刘成林, 等. 2014. 江陵富钾卤水析钾过程中铷流失机理研究[J]. *无机盐工业*, 46(2): 18~20, 6.
- 李瑞琴, 刘成林, 赵艳军, 等. 2021. 青海别勒滩试验区低品位固体钾盐液化开采的野外实验研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(1): 76~88.
- 梁述廷, 刘玉纯, 刘瑛, 等. 2015. X射线荧光光谱微区分析在铜矿物类质同象鉴定中的应用[J]. *岩矿测试*, 34(2): 201~206.
- 刘海宁, 叶秀深, 张慧芳, 等. 2019. 盐湖稀有元素吸附分离提取研究[J]. *盐湖研究*, 27(3): 11~20.
- 马珍. 2022. 盐湖锂资源高效分离提取技术研究进展[J]. *无机盐工业*, 54(10): 22~29.
- 包贞, 伍倩, 丁涛, 等. 2022. 中国盐湖卤水提锂产业化技术研究进展[J]. *无机盐工业*, 54(10): 1~12.
- 史振. 2019. 卤水中铷、铯萃取工艺研究[D]. 天津: 天津科技大学.
- 田郁溟, 琚宜太, 周尚国. 2022. 我国战略矿产资源安全保障若干问题的思考[J]. *地质与勘探*, 58(1): 217~228.
- 王安建, 袁小晶. 2022. 大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考[J]. *中国科学院院刊*, 37(11): 1550~1559.
- 王梦琴, 蔡克大, 李展平. 2023. 飞行时间二次离子质谱(TOF-SIMS)在矿物包裹体研究中的应用[J]. *岩石矿物学杂志*, 42(3): 451~464.
- 王盼盼, 刘鲤君, 赵云. 2021. 卤水中铷、铯、硼、锂分离提取研究进展[J]. *化工管理*, (3): 45~49.
- 武丽平, 袁红战, 靳芳. 2022. 鸭湖构造深部卤水自然蒸发实验研究[J]. *无机盐工业*, 54(11): 71~78.
- 肖喆, 陈贵方, 庞建, 涛, 等. 2019. 昆阳磷矿磷块岩中铬元素的赋存状态分析[J]. *化工矿物与加工*, 48(7): 36~39.
- 谢俊. 2020. 贵州织金磷块岩中稀土类质同象机理研究[D]. 贵阳: 贵州大学.
- 张建锋. 2018. 盐湖卤水中铷铯资源的高效分离提取[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所).
- 张苏江, 张琳, 姜爱玲, 等. 2022. 中国盐湖资源开发利用现状与发展建议[J]. *无机盐工业*, 54(10): 13~21.