西藏盐湖沉积物:一种潜在的铷、铯资源

李庆宽[1,2)],王建萍[1,2)],樊启顺[1,2)],秦占杰*[1,2)],蔚昊学[1,2,3)],
山发寿[1,2)],袁秦[1,2)],都永生[1,2)]

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

内容提要:铷、铯是我国战略性关键矿产资源。西藏盐湖卤水中赋存着丰富的铷、铯资源,但是品位普遍低于10 mg/L。根据热泉与盐湖锂、铷、铯等元素的补给关系和含量差异特征及铷、铯极易被黏土矿物吸附等特点,推测盐湖沉积物中赋存一定规模的铷、铯资源。为验证该推测,本文选取西藏拉果错、聂尔错、依布茶卡、当穹错、扎布耶茶卡等5个典型盐湖,采集卤水和沉积物样品各5件,开展水体中铷、铯含量和沉积物矿物成分分析,结合沉积物分相淋滤实验,得出如下结论:西藏拉果错、当穹错、聂尔错盐湖卤水铷、铯含量和资源量与其补给量差异显著,大量的铷、铯资源消耗于盐湖沉积物中;盐湖沉积物中的铷、铯含量远高于卤水。铷、铯在沉积物水溶相、碳酸盐相中含量较低,主要以吸附形式赋存于黏土矿物(主要为伊利石),吸附点位包括基面位置、难解吸的磨损边缘及层间位置。盐湖沉积物铷、铯资源量远超大型矿床规模,黏土矿物中铷、铯含量高达100 $n\times10^{-6}$,超过固体盐类矿产综合评价指标,相较于现有盐湖钾产品中的铷资源、含铯硅华中的铯资源开发,具有较好的开发利用性,是一种潜在的铷、铯资源。本研究成果有助于完善盐湖铷、铯富集成矿机制,并为高效开发盐湖中的铷、铯资源提供理论支撑。

关键词:铷铯资源;赋存特征;盐湖;沉积物;西藏

铷、铯同属元素周期表中第一主族碱金属元素,二者具有极其相似且独特的物理化学性质,如优异的光电性、化学活泼性、放射性等,在电子器件、催化剂、特种玻璃、生物化学及医药等传统领域和新能源、新材料、航空航天、国防军工、信息技术等新兴产业均有不可替代的作用,是我国战略性关键矿产资源(张霜华,1998;孙映祥等,2019;王登红,2019;张晓伟等,2021;唐国卿等,2022)。

自然界中,铷、铯主要与同族碱金属(锂、钾)和稀有金属(铍、铌、钽等)元素矿床共伴生,独立矿床极少。铷、铯矿床类型包括硬岩型(如花岗伟晶岩型、花岗岩型)、光卤石-钾盐型和地热-卤水型[如热泉(铯硅华)、盐湖卤水、地下卤水](郑绵平等,1995;孙艳等,2019;张晓伟等,2021;唐国卿等,2022)。目前,铷、铯主要从花岗伟晶岩中提取,赋存矿物为锂云母和铯沸石。研究显示,随着品位较高的铷、铯固体矿石资源逐步减少,未来几年全球(除中国外)已探明的固体铷、铯资源将被耗尽(USGS,2022)。我国铷资源较为丰富,已探明的氧化铷储量约18.4万t(孙艳等,2019),但铯资源较缺乏,已探明氧化铯储量约2.47万t;而无论铷或铯,均以硬岩型矿床为主,均为伴生矿床,资源品位低、经济利用可行性较差。

我国青藏高原盐湖卤水中赋存着大量的铷、铯资源,虽然其品位较低(铷、铯含量普遍低于10 mg/L),但资源量巨大、提取工艺流程简单、生产能耗和成本

注:本文为国家自然科学基金项目(编号42202096,U21A2018)、青海省科技厅自然科学基金青年基金(编号2021-ZJ-974Q)、中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(编号YSBR-039)、第二次青藏高原综合考察项目(编号2019QZKK0805,2022QZKK0201)和中国科学院特别研究助理项目联合资助的成果。
收稿日期:2023-03-06;改回日期:2023-04-29;网络发表日期:2023-09-13;责任编委:范宏瑞;责任编辑:袁璐璐。
作者简介:李庆宽,男,1991年生。博士,助理研究员,主要从事盐类矿床成因和演化研究。E-mail:liqingkuan@isl.ac.cn。
*通讯作者:秦占杰,男,1987年生。博士,副研究员,主要从事盐类矿床勘查与成矿研究。E-mail:qinzhanjie@isl.ac.cn。

引用本文:李庆宽,王建萍,樊启顺,秦占杰,蔚昊学,山发寿,袁秦,都永生. 2023. 西藏盐湖沉积物:一种潜在的铷、铯资源. 地质学报,97(10):3410~3420,doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023359.
Li Qingkuan, Wang Jianping, Fan Qishun, Qin Zhanjie, Yu Haoxue, Shan Fashou, Yuan Qin, Du Yongsheng. 2023. Rubidium and cesium enrichment in lacustrine sediments from Tibetan salt lakes: A potential resource. Acta Geologica Sinica, 97(10): 3410~3420.

较低，是未来提取铷、铯资源的重要来源（刘力，2013）。结合已报道的青藏高原盐湖铷、铯相关资料，在 2021～2022 年，研究团队开展了两次系统的西藏盐湖铷、铯资源调查，发现：① 相比于前人统计数据，近年来盐湖卤水铷、铯含量显著下降，可能与湖泊扩张或与湖水淡化有关；② 盐湖卤水中的铷含量普遍高于铯，具有高铷低铯的特征；③ 富铷、铯盐湖卤水中锂、硼含量普遍较高，4 种元素相关性较强，表明盐湖中锂、硼、铷、铯可能具有相似的物质来源。前人研究显示，西藏盐湖中锂、硼、铷、铯的富集与区域强烈活动的热泉的补给密切相关（郑喜玉等，1988；郑绵平等，1989；雒洋冰等，2017）。西藏热泉普遍具有较高的锂、铷、铯等稀有金属元素含量，据统计，西藏 249 个地热泉水中锂、铷、铯元素平均含量分别为 4.72 mg/L、0.45 mg/L 和 2.03 mg/L（佟伟等，2000），热泉中锂、铯含量较接近，且显著高于铷，如果热泉为盐湖提供了主要的锂、铷、铯来源，可推测三者应具有相似的比例关系。然而，盐湖卤水中铷含量显著高于铯，且锂含量又高出铷含量一至两个数量级，二者存在显著的差别。这表明在盐湖区源汇过程中铷、铯元素，尤其是铯，可能被大量损耗。西藏盐湖热泉大多分布于湖区周边，元素迁移路径较短，因此，铷、铯元素很可能损耗在尾闾湖区碎屑和盐类沉积物中。铷、铯作为保守元素，在早期水体蒸发析盐过程中（钾镁盐析出之前）主要在液相中富集，极少进入固相；在钾盐析出阶段，由于 K^+、Rb^+ 地球化学性质相近，大量的 Rb^+ 进入钾盐矿物尤其是光卤石中，使液相中的铷元素含量急剧下降（高丹丹等，2022）。由于近年来西藏盐湖卤水显著淡化，大部分盐湖卤水矿化度较低，钾镁盐矿物难以析出。因此，盐湖区铷、铯元素含量的损耗可能主要与碎屑沉积物有关。碎屑沉积物中的细粒黏土矿物是吸附铷、铯的重要载体（Cornell，1993；Park et al.，2021）。黏土矿物是湖泊沉积物的重要组成部分，具有粒径小、比表面积大、吸附性强等特点，对金属阳离子有着强烈的吸附作用，且其对 Rb^+、Cs^+ 的吸附优先性远高于 Li^+、Na^+、K^+ 等盐湖中常见的一价阳离子（Carroll，1959）。

综上所述，本研究团队推测盐湖区碎屑沉积物可能是卤水中铯消耗的主要载体，因此盐湖沉积物可能是一种潜在的铷、铯资源。为验证该推测，本次研究对多个含铷、铯盐湖开展（西藏当穹错、拉果错、聂尔错、依布茶卡、扎布耶茶卡）卤水和沉积物中铷、铯含量的测定（图 1），并完成沉积物分相淋滤实验，对铷、铯在盐湖沉积物中的含量和赋存特征进行初步研究。本研究成果有助于认识盐湖铷、铯成矿富集机制，并为盐湖资源的综合开发利用提供理论支撑。

1　西藏盐湖概况及铷、铯含量特征

西藏是我国乃至全球盐湖分布最密集的地区之一，该地区的盐湖具有数量多、种类齐、资源富、海拔高等特点。据统计，西藏自治区 2000 多个湖泊中，有盐湖近 500 个，盐湖面积约 8225.18 km^2，占西藏湖泊总面积的 30.46%。面积大于 1 km^2 的盐湖 234 个，占西藏盐湖总面积的 99%，其中藏北高原有盐湖 218 个，藏南 14 个，藏东 2 个（郑喜玉等，2002）。近年来，在高原“暖湿化”背景下，藏北高原盐湖面积显著扩张，湖水淡化明显，部分盐湖已变为咸水湖（Zhang Guoqing et al.，2020）。除赋存石盐、芒硝、天然碱等一般盐类矿产的普通盐湖外，西藏还分布着大量富钾、锂、硼、铷、铯、溴等高附加值元素的特种盐湖，资源开发潜力巨大。

自新生代以来，在印度板块和亚欧板块陆陆碰撞的背景下，高原快速隆升，内部构造活动强烈，在山间形成了一系列的构造断陷盆地和平行于主应力的宽展裂谷，为湖盆诞生奠定基础。冈底斯山—念青唐古拉山自西向东横亘高原中间，使其北部水系变为内流区，并汇聚在盆地低洼处，使得岩石风化及古代含盐地层淋滤出的盐类物质不断聚集。加之，青藏高原极高的海拔使其内部降水稀少，气温低，温差大，蒸发量远大于降水量，干旱的气候为盐湖的形成提供了良好的气候背景，并且由南向北，气候干旱程度逐渐加剧，盐湖数量也逐渐增加。此外，受板块碰撞俯冲影响，高原地壳中存在局部熔融层，受断裂构造控制，在地表形成强烈的地热异常带。目前，已知温泉超过 600 处，在岩浆热液和高温水岩反应下，温泉中携带大量的盐类物质及锂、硼、铷、铯等高附加值元素，为盐湖提供大量的物质来源，也是西藏大量特种盐湖形成的关键因素（郑绵平等，1989）。综上所述，西藏盐湖是构造-物源-气候三者综合控制下形成的特殊资源。西藏拉果错、聂尔错、依布茶卡、当穹错、扎布耶茶卡等盐湖便是上述作用的产物。

前人对西藏部分盐湖中的铷、铯元素含量进行测试，结果显示铷、铯元素在西藏盐湖中具有极为相似的分布特征，铷、铯相关系数值高达 0.867，且铷、铯平均元素含量远高于国内其他区域的盐湖和海

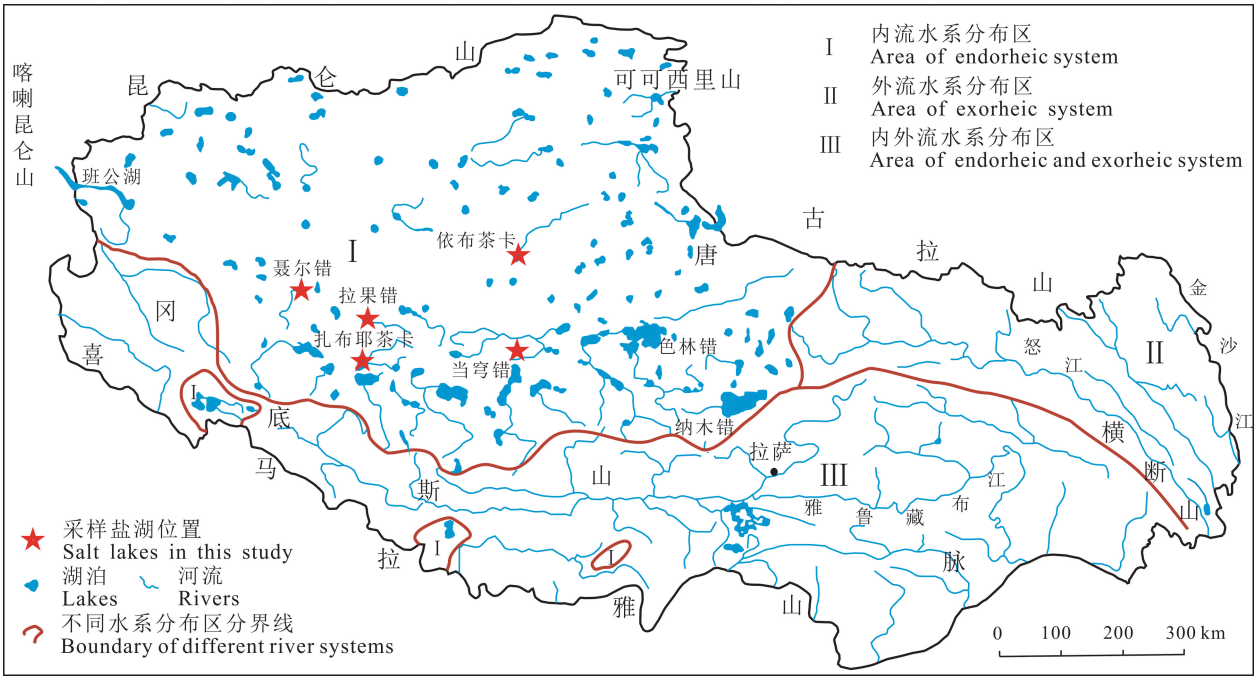

图 1 西藏水系分布及本研究采样的盐湖位置(改自郑喜玉等,1988)

Fig. 1 The distribution of rivers in Tibet and the location of salt lakes in this study (modified from Zheng Xiyu et al.,1988)

水,其中铷元素含量比海水高 45 倍,铯元素含量比海水高 3800 余倍(郑喜玉等, 1988)。西藏扎布耶茶卡是我国最富铷的盐湖,其南部湖区 Rb_2O 含量高达 56 mg/L,可达到卤水铷资源开发利用标准。西藏扎仓茶卡、孔孔茶卡、玛尔果茶卡、拉果错等少数盐湖 Rb_2O 含量大致在 10～20 mg/L 之间,其他大部分盐湖 Rb_2O 含量小于 5 mg/L。西藏盐湖铯元素含量低于铷,仅聂尔错、扎布耶茶卡、热帮错、扎西茶卡等极少数盐湖 Cs_2O 含量高于 20 mg/L,达到卤水铯的综合利用标准,大部分盐湖 Cs_2O 含量低于 1 mg/L(张西营等, 2016)。统计西藏盐湖铷、铯元素含量频率分布,呈现正态(负偏)的特点(图 2;郑喜玉等, 1988)。

2 样品采集与实验方法

2.1 样品采集与前处理

本研究对西藏当穹错、依布茶卡、扎布耶茶卡、拉果错、聂尔错 5 个盐湖进行了系统的考察和样品采集(图 1),采集湖底沉积物样品 5 件、湖水样品 5 件。利用 3 L 不锈钢抓泥斗将湖底沉积物样品采集至塑料袋中,把多余水分排出后运至实验室冷冻保存。将湖水样品采集至 5 L 高密度聚乙烯塑料桶中,采样前需用湖水原样将塑料桶涮洗 3 遍,现场测量水样的 pH、EC、温度等相关物理化学参数。装样的聚乙烯塑料桶使用前均在实验室内用 0.1%的稀盐酸浸泡 24 h,并用蒸馏水清洗至中性后烘干备

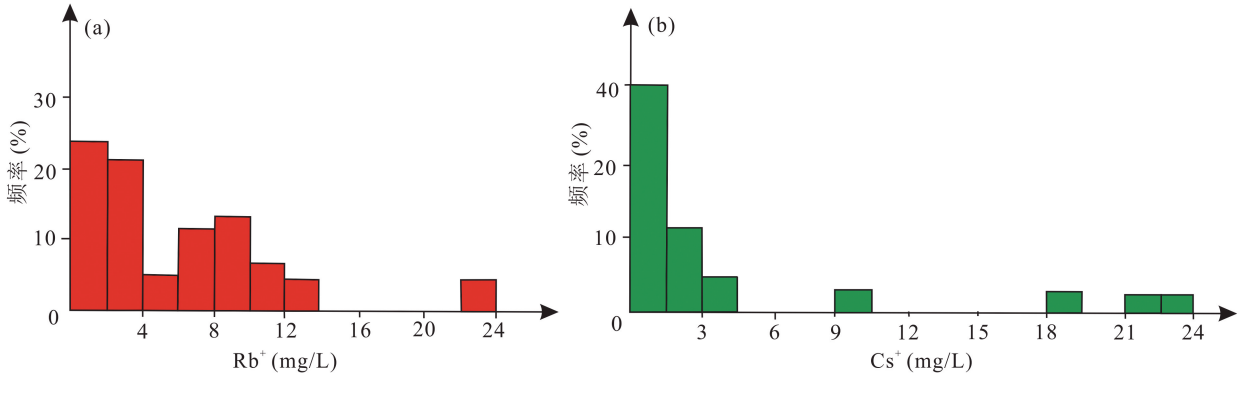

图 2 西藏盐湖卤水铷(a)、铯(b)含量频率分布图(改自郑喜玉等,1988)

Fig. 2 Histograms of Rb (a), Cs (b) concentrations in Tibetan salt lakes (modified from Zheng Xiyu et al.,1988)

用。水样采集后现场或 24 h 内用 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤并用封口胶密封以备分析测试。所有采集的样品均在野外做好编号与记录。

实验室对已采集的沉积物和湖水样品进行前处理：① 取 100 g 沉积物样品放入冷冻干燥机中冻干。待样品冻干后，用玛瑙研钵将样品压碎，挑出其中的大颗粒砂石、植物根系等，并过 20 目尼龙筛。取 20 g 样品用玛瑙研钵研磨至 200 目以下，其中一部分用于 X 射线粉末衍射分析，剩余样品用于分相淋滤实验。② 取 50 mL 水体样品用于铷、铯元素含量分析。

2.2　分相淋滤实验

本次研究采用 Coffey et al.（2021）在湖相沉积物锂元素赋存形式研究中提出的四步提取方法，进一步提取湖相沉积物中酸不溶相的离子含量信息。

（1）水溶相：称取 1 g 左右的沉积物样品加入已洗净的 50 mL 高密度聚乙烯离心管中，用移液枪加入 30 mL 超纯水，然后将离心管放置在振荡器中振荡 24 h，取出离心管并离心 30 min，设置离心机转速为 3000 r/min；将上清液倒出并用 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤至清洁的样品瓶中；本步骤为获取沉积物中水溶组分（即易溶盐类矿物和残余孔隙水）中的铷、铯元素含量特征。

（2）可交换相：在水溶后剩余固体中加入 40 mL 22%的分析纯醋酸铵溶液，溶液需用氨水调节 pH 至 8.0，然后将离心管振荡 12 h，取出离心管在 3000 r/min 转速下离心 30 min，将上清液取出并过滤保存以备分析；本步骤主要为获取沉积物中矿物表面吸附和有机质中的可交换阳离子，也包括一部分低电荷黏土结构（如蒙脱石）中层间的阳离子。

（3）碳酸盐相：在醋酸铵溶解后的固体中继续加入 40 mL 8%的分析纯醋酸，然后与第二步相同，振荡、离心（3000 r/min），并将上清液过滤保存；本步骤主要为获取碳酸盐矿物中铷、铯元素含量。

（4）酸溶相：在剩余固体中继续加入 40 mL 0.1 mol/L 分析纯盐酸，然后振荡，离心（3000 r/min），并获取上清液；本步骤主要为获取酸溶相（包括铁铝氧化物、部分硅酸盐和高电荷黏土结构（如伊利石）中层间）中铷、铯元素含量。

（5）酸不溶相：将离心管中剩余固体用超纯水清洗并离心三遍后，放置于电热鼓风干燥箱中 40℃烘干，并取出称重。称取 0.20 g 左右的样品用王水进行消解，温度控制在 120℃，消解完成后，分析消解液中铷、铯元素含量。

2.3　分析测试

盐湖沉积物样品的矿物组成分析由 X 射线衍射仪（XRD，AERIS）完成。盐湖卤水和淋滤液中铷、铯元素含量采用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS，NexION 2000B）测定，误差小于 10%。上述测试工作均在中国科学院青海盐湖研究所完成。

3　结果

3.1　盐湖卤水中锂、铷、铯元素含量

典型盐湖铷、铯元素含量见表 1。如表 1 所示，西藏拉果错、聂尔错、依布茶卡、当穹错、扎布耶茶卡盐湖中铷（2.1～16.1 mg/L）、铯（0.3～11.4 mg/L）元素含量差异较大，且铷、铯元素含量均低于现代盐湖资源综合评价指标（Rb_2O≥50 mg/L，Cs_2O≥20 mg/L）。依布茶卡、当穹错、扎布耶茶卡盐湖中铯元素含量明显低于铷元素含量，这与前言中表述一致。而拉果错、聂尔错盐湖中铷、铯元素含量相近，与一般盐湖并不一致，但相比于其补给量仍存在显著亏损（见讨论 4.1），其铷、铯元素含量异常仍需在未来进一步开展物源和富集机制研究。

3.2　沉积物样品矿物组成

典型含铷、铯盐湖沉积物的 X 射线衍射图谱见图 3，矿物组成见表 2 和图 4。从表 2 中可看出，盐湖沉积物均含有石英，含量分布在 18%～32%之间，平均为 23.6%；除当穹错外，其他盐湖沉积物中碳酸盐矿物（文石、方解石、白云石、菱镁矿等）含量均较高，平均为 45.8%，这一方面与拉果错、当穹错、扎布耶茶卡等本身为碳酸盐型盐湖有关，一方面

表 1　西藏典型盐湖卤水中铷、铯元素含量

Table 1　The Rb, Cs concentrations in brines from Tibetan salt lakes

湖名	点位	pH	EC(ms/cm)	温度(℃)	Rb(mg/L)	Cs(mg/L)
拉果错	84°09′15″E；32°01′20″N	9.2	55.1	16.2	7.6	11.4
聂尔错	82°14′04″E；32°14′24″N	8.2	131.5	16.9	11.7	10.5
依布茶卡	86°41′14″E；32°58′28″N	8.5	70.9	16.4	2.1	0.3
当穹错	86°43′09″E；31°34′12″N	9.5	142.3	15.7	16.1	0.5
扎布耶茶卡	84°03′05″E；31°30′32″N	9.4	176.0	23.2	13.2	3.6

表 2 西藏典型盐湖沉积物矿物组成(%)

Table 2 The mineral assemblages (%) of sediments from Tibetan salt lakes

湖名	石英	文石	方解石	白云石	石盐	石膏	多硅白云母	鲕绿泥石	无水芒硝	钠长石	菱镁矿
拉果错	18	42	14	5	4	0	6	4	7	0	0
聂尔错	23	22	10	3	8	10	7	6	0	9	2
依布茶卡	26	26	16	9	5	0	13	7	0	0	0
当穹错	32	8	9	7	15	0	13	8	0	8	0
扎布耶茶卡	19	41	5	10	4	0	8	4	0	8	0

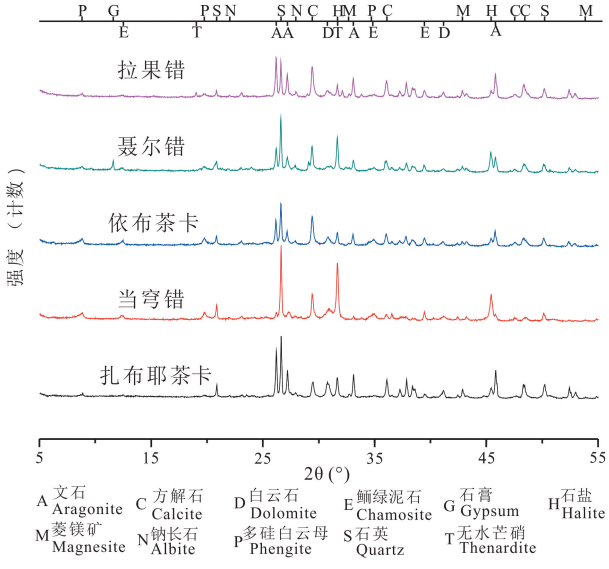

图 3 西藏典型盐湖沉积物 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of lacustrine sediments in Tibetan salt lakes

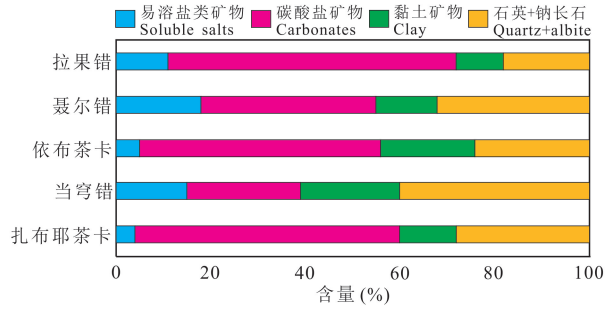

图 4 西藏典型盐湖沉积物矿物组成及含量特征

Fig. 4 The mineral assemblages and contents in Tibetan salt lake sediments

可能与盐湖正处于碳酸盐矿物析出阶段有关。各盐湖沉积物中均含有少量的石盐矿物，可能与沉积物中含有一定量的孔隙水有关，当穹错盐湖石盐含量较高，显示该湖可能有石盐矿物沉积；各个盐湖中仅聂尔错沉积物中含有 10%的石膏和 8%的石盐，表明聂尔错盐湖卤水蒸发、浓缩程度较高，且相比于当穹错，其硫酸根离子含量高，为硫酸盐型盐湖(郑喜玉等，1988)，因此聂尔错盐湖有石膏矿物析出。XRD 结果中多硅白云母和鲕绿泥石一般代表盐湖沉积物中的黏土矿物，可见本次采集的盐湖沉积物中黏土矿物含量较低，平均为 15.2%。

3.3 分相淋滤实验结果

根据不同相态淋滤液所测出的铷、铯元素含量，结合其溶液体积及样品的初始重量，计算得出不同相态铷、铯元素在盐湖沉积物中的含量特征，并列于表 3。从表 3 和图 5 中可看出，与卤水中铷、铯元素含量相差较大，不同盐湖沉积物中铷($41.1\times10^{-6}\sim114.6\times10^{-6}$)、铯($48.1\times10^{-6}\sim181.7\times10^{-6}$)元素含量较接近，且远高于卤水中的铷、铯元素含量；同一盐湖不同相态中铷、铯元素含量变化较大，表明铷、铯在沉积物中分布不均匀，且铷、铯具有类似的含量变化特征，均以酸不溶相中含量最高，指示铷、铯在沉积物中赋存形式较相似。

4 讨论

4.1 西藏典型盐湖卤水铷、铯元素含量与其补给量的差异

当穹错：前人围绕当穹错盐湖锂、硼元素来源展开详细研究，认为湖区周边的热泉是当穹错盐湖锂、硼元素的主要补给源(Lü Yuanyuan et al.，2013；雒洋冰等，2016)。通过对泉水、河水水化学和锂、铷、铯元素含量分析及现代水文补给过程的监测显示，热泉水中的锂、铷、铯元素含量几乎在同一数量级(马尔作和扎日取胜两个主要热泉中锂、铷、铯元素含量分别为 9.17 mg/L、1.49 mg/L、1.25 mg/L 和 1.00 mg/L、0.15 mg/L、0.38 mg/L)。但是，区域中冷泉或未受热泉影响的河水中铷、铯元素含量极低，低于检测限，每年通过泉水和河水补给至湖区的锂、铷、铯资源量分别为 32.6 t、7.84 t、3.30 t。而当穹错湖水中锂、铷、铯元素含量为 451 mg/L、22.8 mg/L、0.71 mg/L，其中锂、铷资源量达 14.06 万 t 和 0.74 万 t，但由于铯含量过低，未获得其资源量。当穹错盐湖锂、铷、铯元素补给量与湖水元素含量和资源量之间存在巨大的差别，可见在湖水蒸发

表 3　西藏典型盐湖沉积物分相淋滤实验结果

Table 3　The results of sequential extraction experiments of sediments from Tibetan salt lakes

湖名	初始质量 (g)	酸不溶物质量 (g)	水溶相($\times10^{-6}$)		醋酸铵溶($\times10^{-6}$)		醋酸溶($\times10^{-6}$)		稀盐酸溶($\times10^{-6}$)		酸不溶相($\times10^{-6}$)		总体($\times10^{-6}$)	
			Rb	Cs	Rb	Cs	Rb	Cs	Rb	Cs	Rb	Cs	Rb	Cs
拉果错	1.0031	0.2515	19.8	35.8	9.5	45.3	3.6	10.1	2.7	21.1	24.0	69.4	59.6	181.7
聂尔错	1.0008	0.3338	14.0	18.8	3.6	18.2	1.0	4.5	1.4	5.8	24.3	41.9	44.4	89.2
依布茶卡	1.0021	0.3804	7.1	2.4	6.5	7.8	2.8	4.1	4.4	3.9	43.1	37.1	63.8	55.3
当穹错	1.0025	0.4423	31.6	1.6	17.1	6.0	6.3	3.4	7.3	2.7	52.2	40.5	114.6	54.2
扎布耶茶卡	1.0062	0.2662	9.6	2.3	3.9	6.2	1.0	2.1	3.6	7.1	23.1	30.4	41.1	48.1

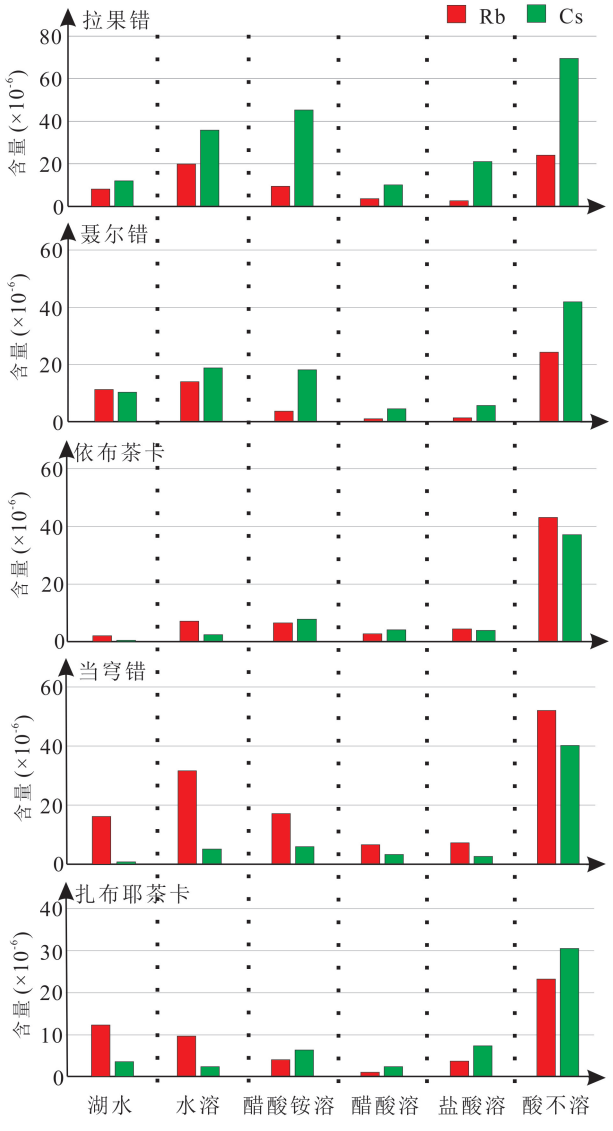

图 5　西藏典型盐湖卤水和沉积物不同相态中铷、铯元素含量特征

Fig. 5　The distribution of Rb, Cs contents in sediments of different extracts and brines from Tibetan salt lakes

浓缩过程中，大量的铷、铯，尤其是铯，消耗于湖区沉积物中。

拉果错：与当穹错类似，拉果错主要地表补给河流为索美藏布和雄布卡，每年补给至湖区的锂、铷、铯资源量分别为 189.81 t、27.36 t、18.81 t，而拉果错湖水中锂、铷、铯元素含量和资源量分别为 269.00 mg/L、11.72 mg/L、9.49 mg/L 和 42.77 万 t、1.30 万 t、1.43 万 t（吕光荣，2013）。湖水中铷、铯元素含量与资源量仍与其主要补给水体带来的铷、铯量存在较大差别，即相比于锂，湖水中大量的铷、铯消耗于湖区。

依布茶卡：本次研究对依布茶卡主要补给水体进行了锂、铷、铯元素含量的测定，发现流域内荣玛温泉和吉瓦温泉锂、铷、铯元素含量较高，分别为 2.12 mg/L、0.50 mg/L、0.98 mg/L（未发表数据）和 7.70 mg/L、1.15 mg/L、2.47 mg/L（方斌等，2009），河水在温泉补给前几乎不含铷、铯元素，而在接受温泉补给后，铷、铯元素含量显著增加，表明温泉是依布茶卡铷、铯的重要补给源。依布茶卡湖水锂、铷、铯元素含量分别为 40.65 mg/L、2.26 mg/L、0.31 mg/L，虽然湖水经历了显著的蒸发浓缩作用，但铷、铯元素含量相比于温泉并未明显富集，铯含量甚至低于温泉水，且铷、铯元素含量远低于锂元素含量，同样表明，湖区沉积物是湖水铷、铯消耗的主要载体。

虽然本次研究未对聂尔错和扎布耶茶卡盐湖开展流域内补给水体中铷、铯元素含量的测试，但二者均受到流域内温泉的补给，且温泉是其锂、硼的重要来源（郑绵平等，1989；刘喜方等，2007，2010），在西藏地热普遍富锂、铷、铯元素且铯元素含量高于铷的特征下，聂尔错、扎布耶茶卡盐湖中高铷低铯的元素含量特征同样表明了铷、铯在盐湖沉积物中的消耗。

4.2　盐湖沉积物不同相态铷、铯元素含量及主要赋存形式

盐湖沉积物中铷、铯元素含量远高于盐湖卤水，且不同相态间铷、铯元素含量差异较大。不同盐湖水溶相中铷（7.1～31.6 mg/L）、铯（1.6～35.8 mg/L）含量特征与其对应卤水（铷：2.1～16.1 mg/L；铯：0.3～11.4 mg/L）较一致，且相比于卤水略有富集

(图 5),表明沉积物水溶相中的铷、铯元素主要来自于沉积物残余孔隙水,在冷冻干燥后,由于水分蒸发使沉积物中铷、铯元素含量升高。水溶相中铷、铯元素含量占沉积物铷、铯总量较低,平均值分别为 25.3%和 10.6%,尤其是铯元素,在依布茶卡、当穹错、扎布耶茶卡盐湖中水溶相铯元素含量仅占沉积物铯总量的 2.8%～4.8%(图 6),显示沉积物中水溶相组分并非铷、铯主要载体。

在醋酸铵淋滤液中,铷、铯元素含量显著不同于卤水和水溶相,呈现铯含量增加,铷含量下降的特征。不同盐湖醋酸铵淋滤液中铷、铯元素含量平均占沉积物中铷、铯总量的 11.7%和 16.7%(图 6)。该淋滤步骤主要为提取矿物表面和有机质中可交换态离子,表明一定量铯和铷被吸附于碎屑沉积物的可交换位置。Carroll(1959)研究发现黏土矿物对阳离子的吸附顺序为 $Li^+ < Na^+ < K^+ < Rb^+ < Cs^+$,表明相比于 Li^+、Na^+、K^+,Rb^+、Cs^+,尤其是 Cs^+,更易被黏土矿物吸附于可交换位置。

在碳酸盐相中,铷(1.0～6.3 mg/L)、铯(2.1～10.1 mg/L)元素含量明显偏低,平均仅占沉积物中铷、铯总量的 4.1%和 5.7%(图 6),表明铷、铯不易进入碳酸盐相中。在稀盐酸淋滤液中,铷(1.4～7.3 mg/L)、铯(2.7～21.1 mg/L)元素含量特征与碳酸盐相中较接近,仅含量略有升高,平均占沉积物铷、铯总量的 5.9%和 9.0%,说明铷、铯在铁铝氧化物、部分黏土结构中也并未显著富集。

在酸不溶相中,铷(23.1～52.2 mg/L)、铯(30.4～69.4 mg/L)元素含量显著增加,平均占沉积物中铷、铯总量的 52.9%和 58.1%(图 6),表明沉积物中的铷、铯主要存在于酸不溶物中;该相态中铯元素含量显著高于其地壳丰度(2×10^{-6}),说明沉积物中铯主要来源于湖水,且以难以解吸的形式存在于酸不溶相中。酸不溶相中的铷元素含量也较高,与铷的地壳丰度(49×10^{-6})较接近,未呈现显著富集,表明相比于铷元素,湖水中的铯元素更易进入沉积物。

尽管本次分步提取实验与前人的提取方法不同,但铯在盐湖沉积物中不同相态的分布特征与前人在土壤中开展的放射性^{137}Cs 分步提取实验结果较一致。Saito et al.(2014)开展的福岛县土壤分步提取铯实验中,也发现铯主要赋存在可交换相、稀酸溶和酸不溶相,在水溶相和碳酸盐相中含量较低,而 Fawaris et al.(1995)在切尔诺贝利核事故后采集瑞典土壤开展实验也发现,放射性铯主要存在于强酸溶和酸不溶相中;相似的结论也在 Riise et al.(1990)的研究中出现,在挪威土壤中,强酸溶和酸不溶相中铯分别占到 42%和 35%,而可交换相中铯占 10%。

盐湖沉积物中酸不溶相除石英和少量长石外,主要为黏土矿物,据徐昶(1993)研究,在藏北高原盐湖中黏土矿物组合以伊利石为主(含量 60%～70%),次为绿泥石(含量 10%～30%),含少量的蒙脱石和高岭石,主要黏土矿物组成和相对含量与分布在整个藏北高原盐湖中变化不明显。前人针对放射性铯在黏土矿物中的吸附形式展开详细研究,在高岭石等 1∶1 层状结构矿物中,铯吸附于矿物表面易被解吸(Willms et al.,2004);在蒙脱石和蛭石等 2∶1 层状结构矿物中,除表面吸附外,铯还可以进入层间位置,并导致矿物层间晶格结构坍塌,最终形成稳定的晶格层间内层络合态,难以被解吸(Park et al.,2019);而在伊利石中,除表面和层间位置外,铯还会吸附于风化形成的磨损边缘位点(Frayed edge sites; FES),该点位对铯有强烈的选择吸附性,难以被解吸(Park et al.,2019)。由于铷与铯具有相似的离子半径,二者在黏土矿物中的吸附行为

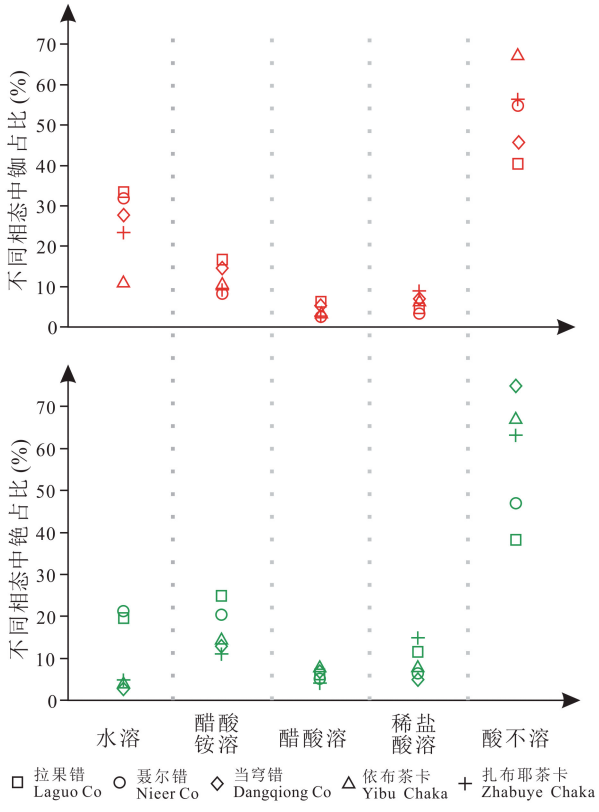

图 6 西藏典型盐湖沉积物中不同相态铷、铯含量占比

Fig. 6 The Rb, Cs proportions of different extracts in lacustrine sediments from Tibetan salt lakes

较一致，且铷吸附于黏土矿物的能力略弱于铯，因此，盐湖沉积物中铷、铯，尤其是铯，由于大量吸附于伊利石矿物的磨损边缘和层间位置，难以被解吸，故在酸不溶相中含量大大增加。

4.3　盐湖沉积物铷、铯资源潜力

本次研究显示，西藏拉果错、聂尔错、依布茶卡、当穹错、扎布耶茶卡盐湖沉积物中铷、铯元素含量分别在 $41.1\times10^{-6}\sim114.6\times10^{-6}$、$48.1\times10^{-6}\sim181.7\times10^{-6}$ 之间，平均值为 64.7×10^{-6}、85.7×10^{-6}。该含量略低于现代盐湖盐类矿产综合评价指标中的固体盐类矿产铷、铯元素含量要求（Rb＞183×10^{-6}，Cs＞94×10^{-6}）。但铯含量已高于含铯硅华的下限（50×10^{-6}；郑绵平等，1995），而铷含量也接近察尔汗盐湖精制氯化钾产品的铷含量（100×10^{-6}；高丹丹等，2022）。含铯硅华和察尔汗盐湖精制氯化钾产品均已开展了相关提取实验，具有较好的经济可采性，表明盐湖沉积物中铷、铯资源也具有良好的开采前景。

研究显示，现今每年补给至拉果错湖区的锂、铷、铯资源量分别为 189.81 t、27.36 t、18.81 t，而拉果错湖水中锂、铷、铯资源量分别为 42.77 万 t、1.30 万 t、1.43 万 t。假设拉果错盐湖锂资源主要赋存在湖水中，则相应地，湖水中应有铷、铯资源量为 6.16 万 t、4.24 万 t。再扣除卤水中铷、铯资源量后，可计算得出，拉果错盐湖沉积物中至少有 4.86 万 t 铷资源和 2.81 万 t 铯资源。根据盐类矿产资源量规模划分标准，铷、铯资源量超过 2000 t（以 Rb_2O 和 Cs_2O 计）即为大型矿床规模，由此可见，盐湖沉积物中铷、铯资源量已达超大型矿床规模。而对于铯含量极低（0.5 mg/L）的当穹错盐湖，通过类似的计算过程，可得出盐湖沉积物中铷、铯资源量分别可达 2.64 万 t、1.42 万 t。由于未能获得扎布耶茶卡锂、铷、铯元素年均补给量，本次研究假设扎布耶茶卡含盐沉积厚度为 5 m（前人研究显示，该盐湖含盐沉积厚度一般超过 5 m（郑喜玉等，1988）），盐湖面积为 250 km^2，扣除水溶相铷、铯含量后，沉积物中铷、铯含量为 31.5×10^{-6}、45.8×10^{-6}，假设沉积物密度为 2.0 g/cm^3，则可粗略计算出扎布耶茶卡盐湖中铷、铯资源量为 7.87 万 t、11.45 万 t。总结以上研究，可得出西藏盐湖沉积物中铷、铯资源量规模十分巨大。

上述讨论显示，盐湖沉积物中黏土矿物是铷、铯富集的主要载体，而残留孔隙水和碳酸盐中铷、铯含量明显偏低。黏土矿物对金属阳离子有着强烈的吸附作用，尤其对铷、铯的吸附优先性远高于锂、钠、钾等盐湖中常见的一价阳离子。我们对比此次采集的盐湖沉积物中黏土矿物含量，结合除去水溶相和碳酸盐相的沉积物中铷、铯含量，可粗略计算得出盐湖黏土矿物中的铷、铯元素含量分别为 $225.6\times10^{-6}\sim365.0\times10^{-6}$ 和 $234.5\times10^{-6}\sim1357.8\times10^{-6}$（表 4）。需注意，由于仅除去水溶相和碳酸盐相的铷、铯元素含量，沉积物中有机质、石英、长石、铁铝氧化物等仍可赋存一定量的铷、铯，这将导致计算结果偏高。然而，即使将计算的铷、铯含量降低一半，盐湖黏土矿物中铷、铯含量最高可分别达 182.4×10^{-6} 和 679.0×10^{-6}。在铷、铯含量较高的拉果错盐湖（Rb：7.6 mg/L；Cs：11.4 mg/L），计算的黏土矿物铷、铯含量在扣除一半后仍高达 180.9×10^{-6} 和 678.9×10^{-6}。即使卤水铷（2.1 mg/L）、铯（0.3 mg/L）含量较低的依布茶卡盐湖，其盐湖黏土矿物中铷、铯含量在扣除一半后仍高达 135.0×10^{-6} 和 122.1×10^{-6}，表明即使铷、铯含量较低的盐湖中黏土矿物仍可显著富集铷、铯资源。盐湖黏土矿物中铷、铯，尤其是铯，除少量以可交换态存在外，大部分以难以解吸的磨损边缘点位和层间络合态存在于伊利石黏土矿物中，且黏土矿物与盐湖沉积物中其他易溶盐、碳酸盐、石英、长石等矿物共同沉积，如何高效地将铷、铯元素从黏土矿物中解吸出来并排除其他离子的影响，是未来开发该类型资源的技术核心。鉴于放射性铯在土壤中存在潜在污染，前人开展了大量的土壤或黏土矿物中解吸铯的研究，在高温条件（＞200℃）下，利用酸或长链烷基铵可有效地从伊利石矿物中解吸铯元素（Park et al.，2021）。这为未来盐湖沉积物中铷、铯资源的开发奠定了良好基础。

表 4　西藏典型盐湖沉积物黏土矿物中计算的铷、铯含量

Table 4　The calculated Rb, Cs concentrations of clays in lacustrine sediments from Tibetan salt lakes

湖名	黏土矿物含量（%）	除去水溶相和碳酸盐相后铷、铯含量（$\times10^{-6}$）		计算的黏土矿物铷、铯含量（$\times10^{-6}$）	
		Rb	Cs	Rb	Cs
拉果错	10	36.2	135.8	362.0	1358.0
聂尔错	13	29.3	65.8	225.4	506.2
依布茶卡	20	54.0	48.8	270.0	244.0
当穹错	21	76.6	49.2	364.8	234.3
扎布耶茶卡	12	30.6	43.7	255.0	364.2

5　结论

铷、铯是我国战略性关键矿产资源，在新兴产业

中具有广泛的应用前景。西藏盐湖蕴藏着丰富的铷、铯资源，开发潜力巨大，但资源品位偏低。根据西藏热泉与盐湖锂、铷、铯补给关系和含量比例差异，推测盐湖沉积物可能是一种潜在的铷、铯资源。通过对西藏拉果错、聂尔错、依布茶卡、当穹错、扎布耶茶卡5个典型盐湖卤水铷、铯元素含量和沉积物矿物组成分析，结合沉积物分相淋滤实验，本文初步探讨了盐湖沉积物中铷、铯元素含量和赋存特征，并评价其铷、铯资源潜力，得出结论如下：

(1) 西藏拉果错、当穹错、依布茶卡盐湖卤水中铷、铯元素含量和资源量与其补给量差异显著，大量的铷、铯资源赋存于盐湖沉积物中。

(2)西藏盐湖沉积物中铷、铯元素含量显著高于卤水，铷、铯主要以吸附形式富集于黏土矿物(伊利石为主)中，而在水溶相和碳酸盐相中含量较低，这与前人研究结论具有较好的一致性；铯在伊利石矿物的吸附点位包括可交换的基面位置和难以解吸的磨损边缘和层间点位。

(3) 通过锂、铷、铯补给量与资源量差异，粗略估算盐湖沉积物中铷、铯资源量远超大型铷、铯矿床规模；对比盐湖钾产品铷资源、含铯硅华铯资源的开发现状，盐湖沉积物中黏土矿物铷、铯资源具有良好的开发前景。

本次研究仅开展了不同盐湖少量沉积物中铷、铯元素含量和赋存特征的研究。未来需进一步开展盐湖沉积剖面中铷、铯含量变化，提取盐湖黏土矿物并对高盐高铷、铯溶液中铷、铯在黏土矿物中的赋存形式开展详细的研究，以确定盐湖沉积物中铷、铯资源开发潜力，并为高效提取盐湖沉积物中铷、铯资源提供理论基础。

致谢：感谢中国科学院青海盐湖研究所王波、薛园、李园、马修臻、马喆、韩丽等完成了主微量元素和矿物组成的测试工作；评审专家提出了有益的意见和建议使文章质量得到提升，也使作者受益匪浅；在此一并致谢。

References

Carroll D. 1959. Ion exchange in clays and other minerals. Bulletin of the Geological Society of America, 70: 749～780.

Coffey D M, Munk L A, Ibarra D E, Butler K L, Boutt D F, Jenckes J. 2021. Lithium storage and release from lacustrine sediments: Implications for lithium enrichment and sustainability in continental brines. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 22, e2021GC009916.

Cornell R M. 1993. Adsorption of cesium on minerals: A review. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 171: 483～500.

Fang Bin, Yang Yunjun, Wang Genhou, Zhou Xun, Chen Shengnan. 2009. Characteristics and resource evaluation of the Jiwa geothermal field in central Qiangtang, northern Tibet, China. Geological Bulletin of China, 28(9): 1335～1341 (in Chinese with English abstract).

Fawaris B H, Johanson K J. 1995. Fractionation of cesium (Cs-137) in coniferous forest soil in central Sweden. Science of the Total Environments, 170, 221～228.

Gao Dandan, Li Dongdong, Fan Yanfei, Li Wu. 2022. Economically utilization of the rubidium resources in Qarhan Salt Lake: From fundamental study to technology innovation. Journal of Salt Lake Research, 30(3): 1～11, 41 (in Chinese with English abstract).

Garcia M G, Borda L G, Godfrey L V, Steinmetz R L L, Losada-Calderon A. 2020. Characterization of lithium cycling in the Salar De Olaroz, central Andes, using a geochemical and isotopic approach. Chemical Geology, 531, 119340.

Liu Li. 2013. Rubidium and cesium resources and technical status in China. Xinjiang Nonferrous Metals, Supplementary 1, 158～163, 165 (in Chinese).

Liu Xifang, Zheng Mianping, Qi Wen. 2007. Sources of ore-forming materials of the super large B and Li deposit in Zabuye Salt Lake, Tibet, China. Acta Geologica Sinica, 81(12): 1709～1715 (in Chinese with English abstract).

Liu Xifang, Zheng Mianping. 2010. Geological features and metallogenic mechanism of the Nieer Co magnesium borate deposit, Tibet. Acta Geologica Sinica, 84(11): 1601～1612 (in Chinese with English abstract).

Luo Yangbing, Zheng Mianping. 2016. Origin of boron in the Dangxiong Co Salt Lake, Tibet, China. Acta Geologica Sinica, 90(8): 1900～1907 (in Chinese with English abstract).

Luo Yangbing, Zheng Mianping, Ren Yaqiong. 2017. Metallogenic correlation of special salt lake and hydrotherm, Qinghai-Tibet Plateau, China. Science & Technology Review, 35(12): 44～48 (in Chinese with English abstract).

Lü Guangrong. 2013. The Tibet autonomous region in Gaize County-Analysis of metallogenic mode and prospecting prospect Saline Lake Laguocuo. Master degree thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

Lü Yuanyuan, Zheng Mianping, Chen Wenxi, Zhang Xuefei, Liu Xifang, Wu Qian, Yu Jiangjiang. 2013. Origin of boron in the Damxung Co Salt Lake (central Tibet): Evidence from boron geochemistry and isotopes. Geochemical Journal, 47: 513～523.

Park S M, Alessi D S, Baek K. 2019. Selective adsorption and irreversible fixation behavior of cesium onto 2 : 1 layered clay mineral: A mini review. Journal of Hazardous Materials, 369, 569～576.

Park S M, Kim J G, Kim H B, Kim Y H, Baek K. 2021. Desorption technologies for remediation of cesium-contaminated soils: A short review. Environmental Geochemistry and Health, 43: 3263～3272.

Riise G, Bjornstad H E, Lien H N, Oughton D H, Salbu B. 1990. A study on radionuclide association with soil components using a sequential extraction procedure. Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry, 142, 531～538.

Saito T, Makino H, Tanaka S. 2014. Geochemical and grain-size distribution of radioactive and stable cesium in Fukushima soils: Implications for their long-term behavior. Journal of Environmental Radioactivity, 138, 11～18.

Sun Yan, Wang Denghong, Wang Chenghui, Li Jiankang, Zhao Zhi, Wang Yan, Guo Weiming. 2019. Metallogenic regularity, new prospecting and guide direction of rubidium deposits in China. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1231～1244 (in Chinese with English abstract).

Sun Yingxiang, Lin Bolei. 2019. Research and policy suggestions on development and utilization of rubidium resources at home and abroad. China Mining Magazine, 28(11): 41～43 (in Chinese with English abstract).

Tang Guoqing, Wu Changzhi. 2022. Rubidium and cesium-two

important metals in the rare metals. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 41(5): 1073～1077 (in Chinese with English abstract).

Tong Wei, Liao Zhijie, Liu Shibin, Zhang Zhifei, You Maozheng, Zhang Mingtao. 2000. Thermal Springs in Tibet. Beijing: Science Press, 1～300 (in Chinese with English abstract).

U. S. Geological Survey. 2022. Mineral Commodity Summaries 2022. Reston: U. S. Geological Survey, 1～200.

Wang Denghong. 2019. Study on critical mineral resources: Significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1189～1209 (in Chinese with English abstract).

Willms C, Li Z H, Allen L, Evans C V. 2004. Desorption of cesium from kaolinite and illite using alkylammonium salts. Applied Clay Science, 25, 125～133.

Xu Chang. 1993. Study on the clay minerals in salt lakes in China. Beijing: Science Press, 1～208 (in Chinese).

Zhao Yue, Ma Wanping, Yang Yang, Cui Yi, Xu Lin, Luo Chongguang, Wen Hanjie. 2021. Experimental study on the sorption of Li^+ by clay minerals—implications for clay-type lithium deposit. Acta Mineralogica Sinica, 41: 1～14 (in Chinese with English abstract).

Zhang Guoqing, Yao Tandong, Xie Hongjie, Yang Kun, Zhu Liping, Shum C K, Bolch T, Yi Shuang, Allen S, Jiang Liguang, Chen Wenfeng, Ke Changqing. 2020. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms. Earth-Science Reviews, 208, 103269.

Zhang Shuanghua. 1998. A brief talk on broadening the application field of rubidium and cesium in China. Xinjiang Nonferrous Metals, 2, 43～47 (in Chinese).

Zhang Xiying, Shan Fashou, Shi Guocheng, Tang Qiliang, Li Wenxia, Chen Liang, Ran Guangfen, Wang Bo. 2016. Distribution characteristics of main ore-forming elements in brines of salt lakes and comprehensive evaluation of resource endowment for these elements in China. Journal of Salt Lake Research, 24(2): 1～11 (in Chinese with English abstract).

Zhang Xiaowei, Xin Tianyu, Liu Jiaxing, Ouyang Jiangcheng, Zhang Wanyi, Wang Hongjing. 2021. Analysis on the current situation of global cesium resources and its comprehensive utilization technology. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 41(5): 7～11 (in Chinese with English abstract).

Zheng Mianping, Liu Wengao. 1987. A new Li-mineral: Zabuyelite. Acta Mineralogica Sinica, 7(3): 221～226 (in Chinese with English abstract).

Zheng Mianping, Xiang Jun, Wei Xinjun, Zheng Yuan. 1989. Saline Lakes on the Qinghai-Tibetan Plateau. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1～431 (in Chinese with English abstract).

Zheng Mianping, Wang Qiuxia, Duo Ji, Liu Jie, Pingcuo Wangjie, Zhang Suchun. 1995. A New Type of Hydrothermal Deposit: Cesium-bearing Geyserite in Tibet. Beijing: Geological Publishing House, 1～114 (in Chinese with English abstract).

Zheng Xiyu, Tang Yuan, Xu Chang, Li Bingxiao, Zhang Baozhen, Yu Shengsong. 1988. Salt lakes in Tibet. Beijing: Science Press, 1～190 (in Chinese with English abstract).

Zheng Xiyu, Zhang Minggang, Xu Chang, Li Bingxiao. 2002. Salt Lakes in China. Beijing: Science Press, 1～415 (in Chinese with English abstract).

参　考　文　献

方斌，杨运军，王根厚，周训，陈胜男. 2009. 藏北羌塘中部吉瓦地热田的特征及其资源评价. 地质通报，28(9)：1335～1341.

高丹丹，李东东，樊燕飞，李武. 2022. 察尔汗盐湖铷资源利用——从基础认知到技术创新. 盐湖研究，30(3)：1～11，41.

刘力. 2013. 中国铷铯资源、技术现状. 新疆有色金属(增刊1)，158～163，165.

刘喜方，郑绵平，齐文. 2007. 西藏扎布耶盐湖超大型B、Li矿床成矿物质来源研究. 地质学报，81(12)：1709～1715.

刘喜方，郑绵平. 2010. 西藏聂尔错镁硼矿地质特征及成矿机制. 地质学报，84(11)：1601～1612.

雒洋冰，郑绵平. 2016. 西藏当雄错盐湖卤水中硼的来源研究. 地质学报，90(8)：1900～1907.

雒洋冰，郑绵平，任雅琼. 2017. 青藏高原特种盐湖与深部火山-地热水的相关性. 科技导报，35(12)：44～48.

吕光荣. 2013. 西藏自治区改则县拉果错盐湖地质特征及成因研究. 中国地质大学(北京)工程硕士学位论文.

孙艳，王登红，王成辉，李健康，赵芝，王岩，郭唯明. 2019. 我国铷矿成矿规律、新进展和找矿方向. 地质学报，93(6)：1231～1244.

孙映祥，林博磊. 2019. 国内外铷资源开发利用研究及政策建议. 中国矿业，28(11)：41～43.

唐国卿，吴昌志. 2022. 铷与铯——稀有金属中的绝代双骄. 矿物岩石地球化学通报，41(5)：1073～1077.

佟伟，廖志杰，刘时彬，张知非，由懋正，章铭陶. 2000. 西藏温泉志. 北京：科学出版社，1～300.

王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向. 地质学报，93(6)：1189～1209.

徐昶. 1993. 中国盐湖黏土矿物研究. 北京：科学出版社，1～208.

赵越，马万平，杨洋，崔燚，徐林，罗重光，温汉捷. 2021. 黏土矿物对 Li^+ 的吸附实验研究——对黏土型锂矿成矿启示. 矿物学报，41：1～14.

张霜华. 1998. 浅谈拓宽我国铷铯的应用领域. 新疆有色金属，2，43～47.

张西营，山发寿，石国成，唐启亮，李雯霞，陈亮，冉广芬，王波. 2016. 中国盐湖卤水主要成矿元素分布特征及其资源禀赋综合评价. 盐湖研究，24(2)：1～11.

张晓伟，辛天宇，刘佳兴，欧阳江城，张万益，王红静. 2021. 全球铯矿资源现状及其综合利用技术分析. 矿产保护与利用，41(5)：7～11.

郑绵平，刘文高. 1987. 新的锂矿物——扎布耶石. 矿物学报，7(3)：221～226.

郑绵平，向军，魏新俊，郑元. 1989. 青藏高原盐湖. 北京：北京科学技术出版社，1～431.

郑绵平，王秋霞，多吉，刘杰，平措旺杰，张苏春. 1995. 水热成矿新类型——西藏铯硅华矿床. 北京：地质出版社，1～114.

郑喜玉，唐渊，徐昶，李秉孝，张保珍，于昇松. 1988. 西藏盐湖. 北京：科学出版社，1～190.

郑喜玉，张明刚，徐昶，李秉孝. 2002. 中国盐湖志. 北京：科学出版社，1～415.

Rubidium and cesium enrichment in lacustrine sediments from Tibetan salt lakes: A potential resource

LI Qingkuan[1,2], WANG Jianping[1,2], FAN Qishun[1,2], QIN Zhanjie[*1,2], YU Haoxue[1,2,3], SHAN Fashou[1,2], YUAN Qin[1,2], DU Yongsheng[1,2]

1) *Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai* 810008, *China*;

2) *Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining, Qinghai* 810008, *China*;

3) *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

* *Corresponding author: qinzhanjie@isl.ac.cn*

Abstract

Rubidium and cesium are critical metal mineral resources. Abundant Rb and Cs resources with low grade (<10 mg/L) occur in brines from Tibetan salt lakes. According to the supply relationship between hot springs and salt lakes, and their heterogeneity of Li, Rb, Cs concentrations, the possibility of enrichment of Rb, Cs in the lacustrine sediments is evaluated. To verify the hypothesis, 5 brine and sediment samples are collected from the Laguo Co, Nieer Co, Yibu Chaka, Dangqiong Co and Zhabuye Chaka salt lakes, respectively, and sequential extraction experiments are conducted on the sediments. The Rb, Cs concentrations of brines and extracts, and the mineral assemblages of sediments are analyzed. Large heterogeneities exist between the Rb-Cs supply from the rivers and resources in the brines from Laguo Co, Yibu Chaka, Dangqiong Co salt lakes, indicating that abundant Rb-Cs resources occur in the lacustrine sediments. The Rb and Cs concentrations in the sediments are apparently higher than those of the brines; Rb and Cs are enriched in the clay minerals (mainly illite), with the forms of the exchangeable basal position and the irreversible FES and interlayer positions. The potential Rb and Cs resources in lacustrine sediments are much higher than the requirements of large-scale Rb-Cs deposits, and the Rb and Cs concentrations in the clay minerals reach up to several hundreds of ppm. Compared with the development status of Rb resources from the KCl products, and Cs resources from the geyserite, the Rb and Cs resources from lacustrine sediments in the Tibetan salt lakes show great resource potential. This study can be beneficial for the high-efficient utilization of salt lake resources.

Key words: rubidium and cesium resources; occurrence; salt lakes; sediments; Tibet