

中国铷铯资源、提取技术与开发利用研究

王云生¹⁾, 郭娟²⁾, 刘喜方¹⁾, 伍倩^{1)*}, 乜贞¹⁾, 卜令忠¹⁾, 余疆江¹⁾

1)中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037;

2)自然资源部信息中心, 北京 100812

摘要: 铷、铯具有优异的物理化学性能, 不仅在电子器件、催化剂、特种玻璃等传统领域中, 在高科技新兴应用领域也有广泛的用途。我国铷、铯资源相对丰富, 类型多样, 不仅有固体矿, 而且还有液体矿。本文介绍了国内铷铯资源、提取技术及特点、资源开发利用现状。国内铷铯资源以固体矿为主, 铷、铯的储量分别为 116 万 t(Rb₂O)和 14 万 t(Cs₂O)。利用酸法从固体矿提取铷铯已实现工业化, 萃取法和离子交换法在液体矿上更具有应用前途。广东天堂山铷矿开发项目在近年来备受关注。指出盐湖及地下卤水中的铷铯资源更具发展潜力, 建议加强国内铷铯资源调查、勘查和低品位固体矿、液体矿资源综合提取技术攻关, 拓宽铷铯产品新性能和应用领域。

关键词: 铷铯; 资源; 提取技术; 开发利用; 建议

中图分类号: F124.5 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.072401

Research on Rubidium and Cesium Resources, Extraction Technology, Development, and Utilization in China

WANG Yunsheng¹⁾, GUO Juan²⁾, LIU Xifang¹⁾, WU Qian^{1)*}, NIE Zhen¹⁾,
BU Lingzhong¹⁾, YU Jiangjiang¹⁾

1) MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Information Center of Ministry of Natural Resources, Beijing 100812

Abstract: Rubidium and cesium have excellent physicochemical properties and are widely used in traditional applications, including electronic devices, catalysts, and special glass, and emerging high-tech applications. Cesium and rubidium resources in China are relatively abundant and of various types, including solid and liquid minerals. This study focused on domestic rubidium and cesium resources, extraction technology and characteristics, and the current situation of resource development and utilization. Domestic rubidium-cesium resources are primarily solid ores, with reserves of rubidium and cesium in the forms of Rb₂O and Cs₂O amounting to 1.16 million and 140 000 tons, respectively. The extraction of rubidium-cesium from solid ores using the acid method has been industrialized, and the extraction and ion-exchange methods hold promise for liquid ore application. Recently, the rubidium mine, in Tiantangshan, Guangdong Province, a development project has attracted increasing attention. Rubidium and cesium resources in salt lakes and underground brines have more development potential, indicating the need to strengthen domestic rubidium-cesium resource investigation, surveys, comprehensive extraction technology research and development for low-grade solid and liquid ore resources, and broadening the rubidium-cesium products regarding new performance and application areas.

Key words: rubidium and cesium; resource; extraction technology; development and utilization; suggestion

本文由中国工程院重大咨询项目“中国可持续发展矿产资源战略研究-化工、盐湖卷”(编号: 2012-ZD-10-7)、“柴达木盐湖钾及新能源锂、铷等综合评价与环境协调发展研究”(编号: 2016-XZ-111)、“新形势下我国钾锂铷铯关键战略性矿产资源-产业高质量发展战略研究”(编号: KQ2301)联合资助。

收稿日期: 2024-05-24; 改回日期: 2024-07-16; 网络首发日期: 2024-07-26。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王云生, 男, 1976年生。博士, 副研究员。主要从事盐湖卤水资源综合利用研究。E-mail: wys0907@aliyun.com。

*通信作者: 伍倩, 女, 1983年生。博士, 副研究员, 硕士生导师。长期从事盐湖卤水资源开发与综合利用研究。

E-mail: wuqian0516@163.com。

铷、铯及其化合物因其优异的光电性能不仅在电子工业、玻璃陶瓷、催化剂、生物化学及医药等传统应用领域中有较大的发展,而且在能源转换、通讯技术、深井钻探等新兴应用领域中,也显示了强劲的生命力。据统计,全球铷铯产品主要消费国是美国、德国、日本和中国,应用领域主要在有机催化剂领域和高科技领域。随着新能源、新材料、新一代信息技术等战略性新兴产业的快速崛起,铷铯盐应用领域逐渐扩大,市场需求量递增,铷铯日益受到世界各国的重视,已被美国、日本、加拿大列入关键矿产或战略性矿产清单(毛景文等, 2019a; 梅燕雄等, 2022)。我国正处在工业化后期、现代化建设的关键时期,关键矿产需求快速增长。据预测,2025年中国铷和铯市场规模总量将达到2020年的2倍(高芯蕊等, 2023)。为增强我国铷铯等战略性矿产资源供应保障能力,国内学者建议加强对铷铯等关键矿产资源的关注(毛景文等, 2019a; 张生辉等, 2022)。本文通过收集资料,梳理了国内铷铯资源、提取技术及特点、资源开发利用现状,从铷铯资源勘查、技术攻关、拓宽应用领域等角度提出建议。

1 全球铷、铯资源概况

铷和铯在自然界的分布相当广泛,主要和锂、铍、铌等稀有金属或盐类矿物共伴生,全球至今未发现铷和铯独立矿床。世界上铷铯资源主要集中于花岗岩型、花岗伟晶岩型、盐湖型和卤水及热泉型矿床中(郑绵平等, 1995; 赵元艺等, 2008; 孙艳等, 2019),富含铷铯的矿物有锂云母、铯沸石、钾长石、钾盐等十余种矿物,盐湖及地下卤水含有丰富的铷铯,但多数浓度较低(高芯蕊等, 2023)。

根据美国地质调查局最新数据显示,2023年全球铷、铯矿产资源储量均不到20万吨,主要集中在澳大利亚、加拿大、纳米比亚和中国,但没有给出国别储量数据(USGS, 2024)。加拿大Tanco矿区是全球铯沸石资源仅剩的主力可开采矿山,铯沸石中 Cs_2O 含量为23.3%。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)铷铯矿石库存将被耗尽(USGS, 2024)。

美国地质调查局自2021年发布的全球铷、铯储量统计数据包含中国,但铷和铯的储量数据与之前发布的储量数据相比,呈现一增一减的变化,与国内相关机构公布的数据也存在较大差异(高芯蕊等, 2023)。

2 我国铷、铯资源

国内固体铷铯资源主要有伟晶岩型、花岗岩型、硅华型、湖相沉积型,代表性矿物有锂云母、

铯沸石、铯硅华(刘力, 2013; 周潇等, 2024)。铷资源以硬岩型铷资源为主,多数矿床中 Rb_2O 含量基本都处于0.1%~0.2%之间。云母型铷矿资源在江西和湖南以及河南分布较多,长石型铷矿资源主要分布在新疆和山西省份(孙艳等, 2019);铯沸石主要分布在新疆、四川、河南、江西和湖南等省份(胡方泱等, 2023)。

据2022年全国矿产资源储量统计表(自然资源部, 2023),我国铷储量116万t(Rb_2O),主要集中在江西省,河南和湖南有少部分(图1)。我国铷资源约有2/3分布在江西,新疆、广东、内蒙、湖南和河南有少量分布。近年来,在甘肃、新疆、广东等省区发现一批花岗岩型铷矿,如广东天堂山 Rb_2O 资源量达17.56万t,平均品位为0.11%、甘肃国宝山 Rb_2O 资源量达28.1万t,平均品位为0.13%(吴昌志等, 2021),以及新疆白龙山伟晶岩型铷矿 Rb_2O 资源量达31万t,平均品位为0.15%(王核等, 2021),但绝大多数铷赋存在天河石中,云母类铷矿数量不多(毛景文等, 2019b)。

据2022年全国矿产资源储量统计表,我国铯储量14万t(Cs_2O),主要集中在江西省,河南有少量(自然资源部, 2023)。我国花岗伟晶岩型铯矿资源主要分布在江西、新疆、湖南、四川、江苏、广东等地区。其中江西宜丰县铯矿资源量,居全国第一,占全国的70%以上;另外,还赋存于西藏富饶热泉型矿床中(郑绵平等, 1995; 赵元艺等, 2008)。最近,在柴达木盆地盐湖黏土层发现铷和铯的超常富集(潘彤等, 2023),西藏吉隆发现 Cs_2O 平均含量达34%的铯沸石(胡方泱等, 2023)。

液体铷铯资源包括现代盐湖型、地下卤水型、热泉水型,主要分布在西藏扎布耶、拉果错、麻米错、青海察尔汗盐湖、东西台盐湖、一里坪盐湖、大小柴旦等盐湖、地热水以及四川平落坝、威远和湖北江陵等地区的地下卤水中(李建森等, 2022; 李庆宽等, 2023; 周潇等, 2024),卤水中铷铯品位详见表1。青藏高原85个盐湖中 Rb_2O 和 Cs_2O 的资

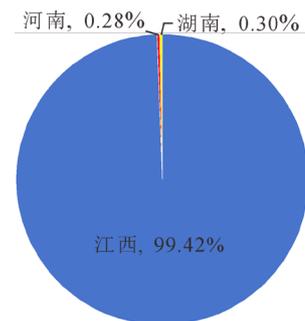


图1 我国铷资源储量分布(自然资源部, 2023)
Fig. 1 Distribution of rubidium resources in China (Ministry of Natural Resources, 2023)

表 1 国内富含铷、铯的盐湖及地下卤水
Table 1 Salt lakes and underground brines rich in rubidium and cesium in China

地区	Rb/(mg/L)	Cs/(mg/L)	来源
青海察尔汗晶间卤水	14		刘磊等, 2022
四川威远	6	22	刘力, 2013
湖北江陵	60	23.2	王春连等, 2018
四川平落坝	32.55	3.4	卢智, 2011
西藏拉果错	7.6	11.4	李庆宽等, 2023
西藏聂尔错	11.7	10.5	李庆宽等, 2023
西藏扎布耶盐湖	32.8~34.2	12.2~15.2	郭秀红等, 2008
西藏麻米错	35.09	18.55	周潇等, 2024

源量达到大型及中型矿床的盐湖达十余个, Rb_2O 资源量共 4.75 万 t, 为大型铷矿床规模的 23.73 倍; Cs_2O 资源量共 2.85 万 t, 为大型铯矿床规模的 14.27 倍(周潇等, 2024)。

整体来说, 我国目前已查明的铷、铯资源以固体矿为主, 均为伴生矿床, 可靠的储量较少。国内盐湖及地下卤水中蕴含有丰富的铷、铯资源, 但其资源量详查工作不多, 仅对高品位的西藏麻米错、拉果错、扎布耶等几个盐湖进行了详查。资源持有方面, 中矿资源集团股份有限公司持有加拿大 Tanco 和津巴布韦 Bikita 矿山, 但形势不容乐观。

3 铷铯提取技术

按原料不同, 铷铯提取技术可分为固体矿和液体矿两类。针对锂云母和铯沸石等固体矿石, 主要分为焙烧法、酸法、压煮法(张秀峰等, 2021; 刘磊等, 2022), 工艺流程如图 2 所示。盐湖及地下卤水

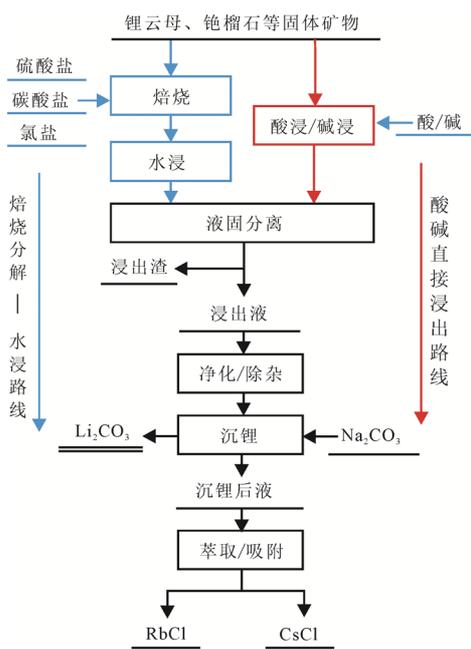


图 2 固体矿物中铷铯提取工艺流程(据刘磊等, 2022 修改)

Fig. 2 Rubidium-cesium extraction process from solid minerals (modified from LIU et al., 2022)

等液体矿中, 溶剂萃取法和离子交换法的研究十分活跃(宝阿敏等, 2017)。

3.1 固体矿物中提取铷铯

3.1.1 焙烧法

焙烧法采用高温助剂对矿石进行高温焙烧, 破坏矿石结构, 使所含的铷和铯释放出来并转变为可溶性盐类, 再通过水浸方式回收。焙烧法根据添加物的不同可分为: 石灰石焙烧法、硫酸盐焙烧法、氯化焙烧法等(刘磊等, 2022; 简鹏等, 2024)。

在 20 世纪 80 年代, 我国的江西锂厂、新疆有色金属工业公司曾采用石灰石烧结法进行生产锂、铷、铯产品, 石灰石与锂云母矿按一定比例混合, 细磨后在 900 °C 左右进行焙烧, 焙烧料水淬后细磨浸出, 浸出液除杂后蒸发结晶, 得到 $LiOH$ 产品, 沉锂母液经溶剂萃取回收铷、铯盐(刘磊等, 2022)。石灰石烧结法后期因渣量大、能耗大、成本高而遭淘汰。硫酸盐焙烧法常采用硫酸钠、硫酸钾和硫酸钙等单一硫酸盐或复合硫酸盐作为助剂, 由于硫酸钾的价格较高, 导致传统硫酸盐法的成本居高不下, 同时存在焙烧浸出率低的缺点, 故在传统硫酸盐法中关于铷、铯回收的研究不多(郭春平等, 2015)。氯化焙烧法所用氯化剂通常为氯化钙、氯化钠、氯化钾和氯化铵等, 其工艺流程短, 是目前实验室阶段研究最多的工艺, 在各种类型的矿石中提铷、铯都有所应用, 相对效果较好, 但其产生的废气是个难处理的问题(刘磊等, 2022)。在此基础上, 为了节能降耗减排, 浓酸熟化、复合盐焙烧等手段受到了更多的关注。锂云母矿采用硫酸熟化工艺, 铷和铯的提取率分别为 96.0% 和 95.1%(Zhang et al., 2019), 锂云母精矿与复合盐焙烧, 氯气排放少、浸出效果优于单一盐添加剂, 铷和铯的浸出率分别为 92.58%、85.37%(朱军等, 2022)。

3.1.2 酸法

酸法主要包括盐酸法和硫酸法两种, 其中盐酸法较古老, 并且提取步骤复杂, 生产成本较高, 目前已基本被硫酸法替代。硫酸法是目前工业上应用较多的铷、铯提取方法。锂云母或铯沸石经过粉碎磨细后, 通过硫酸溶解矿石中的铝来破坏原有的矿物结构, 使锂、铷和铯进入溶液中从而得到含铷、铯的盐溶液, 经过纯化、结晶、热分解等工艺去除杂质, 再通过离子交换或萃取得到纯度较高的铷、铯化合物(刘磊等, 2022)。硫酸法工艺流程复杂, 条件不易控制、废水量大, 但最终产物较纯。中矿资源公司采用硫酸法提取铯, 以铯沸石为原料, 硫酸浸出, 得到铯矾, 分离后的硫酸铯溶液, 经过浓缩转化后制取硫酸铯和碳酸铯等产品, 公司铷铯盐精细品年产量近千吨, 也是全球甲酸铯重要的生产商

和供应商。

3.2 卤水中提取铷铯

3.2.1 溶剂萃取法

萃取法具有反应速度快、处理容量大、易操作的优点。酚醇类试剂、冠醚、二苦胺及其衍生物和硝基化合物等对铷、铯离子具有较好萃取性能,其中酚醇类试剂的研究最为深入并实现工业化,冠醚多用在碱金属分析目的的研究,二苦胺和硝基化合物等近年来已很少应用。

醇酚类试剂应用最多的是 4-仲丁基-2-(α -甲基)苯酚(BAMBP)和 4-叔丁基-2-(α -甲基)苯酚(t-BAMBP),常用的稀释剂为磺化煤油、环己烷等。国内东鹏新材和赣锋锂业采用 t-BAMBP 萃取法从提锂后母液中分离铷和铯,以不同无机酸或有机酸进行反萃,制得多种铷、铯化合物。东台吉乃尔盐湖脱钾后的卤水,用 t-BAMBP-磺化煤油体系,经过 5 级逆流萃取, Rb^+ 和 Cs^+ 的最终萃取率分别达到 95.04% 和 99.80%(Liu et al., 2015)。拉果错盐湖卤水的 t-BAMBP-磺化煤油萃取分离铷铯实验,当逆流萃取级数为三级时,铷铯的萃取率最高,分别为 29.5% 和 94.5%(庞登科, 2020)。对平落坝地下卤水采用 t-BAMBP-磺化煤油/D80 体系进行萃取,四级萃取后铷的收率可达 95% 左右(卢智, 2011)。

3.2.2 离子交换法

离子交换法具有实验工艺流程简单、回收率高、选择性好的优点。有机离子交换剂由于其耐热性、抗辐射性、选择性差,在实际生产上应用不多,因此研究的重点是无机离子交换剂,主要包括天然矿物类、无机盐类、金属氧化物类等(谢绍雷等, 2023)。

以沸石、蒙脱石和硅藻土为主的天然矿物因为其结构独特、价格低廉,纷纷在卤水、核废液、地热水中铷铯吸附研究上得以使用,但研究发现天然矿物吸附容量普遍不高,无法实现铷、铯的分步洗脱(王雪静等, 2002; 叶秀深, 2009),后续以改性或合成的天然矿物材料为主(谢绍雷等, 2023)。

磷钼酸铵、磷钨酸铵及复合吸附剂是无机盐类吸附剂中的研究热点,在制盐母液、高放废液、盐湖及地下卤水中吸附铷铯使用(李颖等, 2019), 研究结果表明其对铷、铯的选择性高,但机械性能和水力学性能较差,不利于大规模柱操作。以磷酸锆和磷酸钛为代表的多价金属酸性盐,对铷、铯的选择性高,稳定性好,吸附后交换柱容易再生,但酸度和盐浓度对其交换容量有较大影响,对铷和铯两者的分离效果较差(宝阿敏等, 2017)。金属亚铁氰化物及复合材料的吸附研究上,多数关注对高放废料中 Cs 的吸附回收,以高盐量的盐湖卤水为研究对象的

工作不多。

总而言之,固体矿中的铷铯是目前工业上提取铷铯产品的主要原料,但提取过程较复杂,成本高,能耗大。硫酸法是工业上应用最广泛的铷、铯矿石处理方法。离子交换法与萃取法则是液体矿中提取铷、铯研究的热门方法,萃取法以酚醇类试剂为代表,离子交换法则多采用沸石、杂多酸盐等,大多在实验室的研究阶段,尚未实现工业化。据统计,在 2013—2021 年间,伴随着铷铯新性能的扩展和需求增加,铷铯分离领域的专利发展增快,活跃程度也增高(葛飞等, 2023)。

未来,利用萃取法和离子交换法从卤水等液态资源中提取铷铯将更具有前途。一是由于国内绝大部分铷、铯主要赋存在盐湖及地下卤水中,萃取法和离子交换法的发展能够有效推动国内铷、铯行业的发展。二是由于从卤水中提铷铯工艺过程更符合环境保护的要求,在“双碳”目标的趋势下更具有发展优势。

4 铷铯资源开发利用现状

我国从 20 世纪 50 年代后期就开始进行铷铯的冶炼研究,60 年代初投入生产,相继开发了国内新疆、江西等省区的铷铯资源,现能够生产十余种铷、铯产品,产品由高纯产品为主逐渐转向工业级产品。国内铷铯资源应用主要集中在传统领域,虽然高科技领域应用占比逐年增加,仍与美国、日本等发达国家差距较大(张晓伟等, 2021; 吴建江, 2023)。

我国的铷铯矿资源虽然资源量较大,但储量较少,且均属伴生矿产资源。铷、铯矿产资源的探矿权数量为 8 个,主要集中在江西、河南、湖南、内蒙古、广东等地区。采矿权方面,2023 年在湖南宜章县长城岭新增一项铷铅锌锡多金属矿采矿权,系全国首张铷矿采矿权证。

固体铷铯资源矿方面,已开发的铷资源主要来自江西宜春伟晶岩型铷矿床中的锂云母和新疆可可托海伟晶岩型铷矿床中的铯沸石。江西宜春是国内重要的铷铯产地,宜春 414 矿中铷的含量约为 0.22%,而加拿大伯尼克湖—坦科矿床中氧化铷的含量是 1.0%。与国外铷矿资源相比,我国铷矿品位低,导致开发利用难度大,国内铷精矿产量不能满足国内市场需求,铷精矿消费大量依赖进口(孙艳等, 2019)。近年来,铷矿开发以广东天堂山大型铷矿的开发最为瞩目,该铷锡多金属矿 Rb_2O 资源量达 17.56 万 t,开发建设项目已进入环评公示阶段,一期设计铷矿采矿规模为 99 万 t/a。天堂山大型铷矿的开发,有望缓解铷精矿主要依靠进口的局面。

伟晶岩型铷矿已开发利用的有新疆可可托海、福建南平、河南官坡等处。其中, 新疆可可托海矿区的铷沸石精矿含 Cs_2O 18%~25%左右, 新疆有色金属研究所采用铷沸石硫酸法提铷工艺建成了年产十余吨铷盐生产线(刘力, 2013)。国内伟晶岩铷矿规模较小, 矿山服务年限短, 自可可托海 3 号矿、南平西坑矿停采后, 还未见其它的独立铷矿开采, 目前我国铷矿石主要依赖于进口。

液体矿方面, 我国青藏高原的盐湖卤水, 柴达木盆地、四川、湖北的地下(油气)卤水中铷、铯资源量很大, 但由于卤水中钾、钠、锂等共生元素的影响, 在目前的技术经济条件下, 赋存于盐湖及地下卤水中的铷铯资源尚未单独进行工业化开采。开发程度较高的察尔汗盐湖, 盐田摊晒过程中发现铷有明显富集, 随光卤石的形成而下降, 开展了氯化钾产品中回收铷的公斤级小试和吨级放大试验, 获得了浓度为 400 mg/L 的富铷料液(高丹丹等, 2022; 王超等, 2023)。基于目前卤水资源开发整体状况, 在开发卤水中钾、锂资源的同时, 对铷铯资源综合利用开发为宜。

5 结论与建议

5.1 结论

根据前文对国内外铷铯资源、提取技术及特点、资源开发利用现状等分析, 可以得出以下结论:

我国 Rb_2O 和 Cs_2O 的资源量相对丰富, 已查明的铷、铯资源以固体矿为主, 均为伴生矿床, 可靠的储量较少。铷、铯资源分布集中在江西、新疆、广东、内蒙、湖南和河南等地区。

固体矿铷、铯资源分离提取技术趋于成熟, 酸法、焙烧法已在工业化应用。利用萃取法和离子交换法从卤水等液体矿中提取铷铯尚未实现工业化, 但实验室阶段的研究进展迅速, 随着卤水提铷铯的优势越来越突出, 萃取法和离子交换法将更具有前途。

查明的固体矿铷、铯资源已得到有效开发, 但国内铷铯固体矿资源与国外相比矿石品位偏低, 无法单独经济开采。盐湖及地下卤水中铷、铯资源量详查和开发工作不多, 仅对高品位的西藏麻米错、拉果错、扎布耶等几个盐湖进行了详查; 在开发程度较高的察尔汗盐湖开展了铷的探索性开发工作。

5.2 建议

应加强高品位的铷、铯固体资源调查, 积极寻找热泉型(西藏)、LRN(Li-Rb-Nb)等新类型的铷铯资源。

低品位、难选冶的铷铯资源的分离和选冶技术还有待加大研发力度, 充分利用已探明的资源, 例

如宜春 414 矿、南平西坑矿等尾矿中的铷铯、天河石中的铷, 变废为宝。

盐湖及地下卤水中的铷、铯资源尚未得到充分重视, 应继续开展卤水中铷铯资源的详查工作; 在开发卤水中钾、锂资源的同时, 对铷铯资源综合利用开发。

目前我国铷、铯产品的消费主要集中在传统领域, 高科技领域用量不大。正蓬勃发展的 5G 新型通讯技术以及新的能源转换技术均离不开铷、铯金属及其化合物的参与, 应加强铷、铯金属及其化合物新性能的研发, 拓宽铷、铯的应用领域。

致谢: 感谢中国地质科学院矿产资源研究所赵元艺研究员提出的建设性意见; 感谢匿名审稿专家提出的宝贵审改意见。

Acknowledgements:

This study was supported by Major Consulting Project of Chinese Academy of Engineering (Nos. 2012-ZD-10-7, 2016-XZ-111 and KQ2301).

参考文献:

- 宝阿敏, 钱志强, 郑红, 等, 2017. 铷、铯的分离提取方法及其研究进展[J]. 应用化工, 46(7): 1377-1382.
- 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.
- 高芯蕊, 贾宏翔, 李天骄, 等, 2023. 中国铷铯资源需求展望[J]. 地球学报, 44(2): 279-285.
- 葛飞, 李雷明, 姜莹莹, 等, 2023. 专利视角下铷铯分离技术研究现状分析和评述[J]. 应用化工, 52(2): 639-645.
- 郭春平, 周健, 文小强, 等, 2015. 锂云母硫酸盐法提取铷铯的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), (12): 31-33.
- 郭秀红, 郑绵平, 刘喜方, 等, 2008. 西藏盐湖卤水铷资源及其开发利用前景[J]. 盐业与化工, 37(3): 8-13.
- 胡方决, 刘小驰, 何少雄, 等, 2023. 喜马拉雅淡色花岗岩铷铯成矿作用[J]. 中国科学: 地球科学, 53(12): 2868-2895.
- 简鹏, 周义朋, 柯平超, 等, 2024. 氯化焙烧-水浸法从富铷锂云母矿中提取 Li、Rb[J]. 中国有色冶金, 53(2): 69-78.
- 李建森, 李廷伟, 马云麒, 等, 2022. 柴达木盆地卤水型 Li、Rb 关键金属矿产元素分布特征及富集机制[J]. 中国科学(地球科学), 52(3): 474-485.
- 李庆宽, 王建萍, 樊启顺, 等, 2023. 西藏盐湖沉积物: 一种潜在的铷、铯资源[J]. 地质学报, 97(10): 3410-3420.
- 李颖, 陈侠, 苗淑兰, 等, 2019. 磷酸铵复合材料对铷铯吸附性能的研究[J]. 无机盐工业, 51(6): 34-37.
- 刘磊, 马保中, 王成彦, 等, 2022. 铷的应用及提取工艺研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 13(5): 8-15.
- 刘力, 2013. 中国铷铯资源、技术现状[J]. 新疆有色金属, 36(S1): 158-165.
- 卢智, 2011. 平落坝构造海相深层卤水中铷分离提取技术研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等, 2019a. 关键矿产——国际动向与

- 思考[J]. 矿床地质, 38(4): 689-698.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等, 2019b. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 38(5): 935-969.
- 梅燕雄, 裴荣富, 魏然, 等, 2022. 关键矿产与能源资源安全[J]. 中国矿业, 31(11): 1-8.
- 潘彤, 陈建洲, 丁成旺, 等, 2023. 柴达木盆地盐湖黏土中锂、铷、铯超常富集及其开发潜力[J]. 中国地质, 50(6): 1925-1927.
- 庞登科, 2020. 拉果错盐湖卤水中铷、铯萃取分离工艺研究[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所.
- 孙艳, 王登红, 王成辉, 等, 2019. 我国铷矿成矿规律、新进展和找矿方向[J]. 地质学报, 93(6): 1231-1244.
- 王超, 孙小虹, 丁晓姜, 等, 2023. 察尔汗盐湖晒卤过程中铷和铯元素富集规律研究[J]. 岩石矿物学杂志, 42(5): 701-710.
- 王春连, 黄华, 王九一, 等, 2018. 江陵凹陷富钾锂卤水矿田地质特征及成藏模式研究[J]. 地质学报, 92(8): 1630-1646.
- 王核, 徐义刚, 闫庆贺, 等, 2021. 新疆白龙山伟晶岩型铷矿床研究进展[J]. 地质学报, 95(10): 3085-3098.
- 王雪静, 高世扬, 周建国, 等, 2002. 用天然斜发沸石从西藏地热水中分离提取 K^+ , Rb^+ , Cs^+ 的研究[J]. 盐湖研究, 10(3): 31-37.
- 吴昌志, 贾力, 雷如雄, 等, 2021. 中亚造山带天河石花岗岩及相关铷矿床的主要特征与研究进展[J]. 岩石学报, 37(9): 2604-2628.
- 吴建江, 2023. 国内铷铯分离提纯技术的研究进展[J]. 新疆有色金属, 46(4): 23-24.
- 谢绍雷, 时东, 张禹洋, 等, 2023. 无机吸附材料分离提取铷铯的研究现状[J]. 稀有金属, 47(7): 1020-1042.
- 叶秀深, 2009. 氯化物型卤水中铷、铯的分析与吸附分离研究[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所.
- 张生辉, 王振涛, 李永胜, 等, 2022. 中国关键矿产清单、应用与全球格局[J]. 矿产保护与利用, 42(5): 138-168.
- 张晓伟, 辛天宇, 刘佳兴, 等, 2021. 全球铷矿资源现状及其综合利用技术分析[J]. 矿产保护与利用, 41(5): 7-11.
- 张秀峰, 伊跃军, 谭秀民, 等, 2021. 硫酸熟化锂云母提取铷铯的机理及动力学特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 52(9): 3093-3102.
- 赵元艺, 韩景仪, 郭立鹤, 等, 2008. 西藏搭格架热泉型铷矿床矿物学与矿石组构特征及地质意义[J]. 岩石学报, 24(3): 519-530.
- 郑绵平, 王秋霞, 多吉, 等, 1995. 水热成矿新类型—西藏铷硅矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 周潇, 赵元艺, 陈文西, 2024. 青藏高原盐湖铷铯资源现状、富集规律与提取技术[J]. 地质论评, 70(2): 705-716.
- 朱军, 徐翌童, 郭梅, 等, 2022. 锂云母复合盐焙烧-水浸提取铷铯[J]. 矿冶工程, 42(2): 80-84.
- 自然资源部, 2023. 2022 年全国矿产资源储量统计表[R]. 北京: 自然资源部: 1-24.
- 1377-1382(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]. Acta Geoscientica Sinica, 44(2): 279-285(in Chinese with English abstract).
- GE Fei, LI Leiming, JIANG Yingying, et al., 2023. Analysis and comments on separation for rubidium and cesium from perspective of patents[J]. Applied Chemical Industry, 52(2): 639-645(in Chinese with English abstract).
- GUO Chunping, ZHOU Jian, WEN Xiaoqiang, et al., 2015. Extraction of Lithium, Rubidium and Cesium from Lepidolite by Sulfate Process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), (12): 31-33(in Chinese with English abstract).
- GUO Xiuhong, ZHENG Mianping, LIU Xifang, et al., 2008. Saline Cesium Resource and Prospect of its Exploitation and Utilization in Tibet[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 37(3): 8-13(in Chinese with English abstract).
- HU Fangyang, LIU Xiaochi, HE Shaoxiong, et al., 2023. Cesium-rubidium mineralization in Himalayan leucogranites[J]. Science China Earth Sciences, 66(12): 2827-2852(in Chinese with English abstract).
- JIAN Peng, ZHOU Yipeng, KE Pingchao, et al., 2024. Extraction of lithium and rubidium from rubidium-rich lithium mica ore by chlorination roasting-water leaching process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 53(2): 69-78(in Chinese with English abstract).
- LI Jianshen, LI Tingwei, MA Yunlin, et al., 2022. Distribution and origin of brine-type Li-Rb mineralization in the Qaidam Basin, NW China[J]. Science China Earth Sciences, 65(3): 477-489(in Chinese with English abstract).
- LI Qingkuan, WANG Jianping, FAN Qishun, et al., 2023. Rubidium and cesium enrichment in lacustrine sediments from Tibetan salt lakes: A potential resource[J]. Acta Geologica Sinica, 97(10): 3410-3420(in Chinese with English abstract).
- LI Ying, CHEN Xia, MIAO Shulan, et al., 2019. Study on adsorption properties of ammonium phosphate tungsten composites on rubidium and cesium[J]. Inorganic Chemicals Industry, 51(6): 34-37(in Chinese with English abstract).
- LIU Lei, MA Baozhong, WANG Chengyan, et al., 2022. Research progress in the application and extraction process of Rubidium[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 13(5): 8-15(in Chinese with English abstract).
- LIU Li, 2013. Development and consideration of rubidium and cesium[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 36(S1): 158-165(in Chinese).
- LIU Shiming, LIU Hehui, HUANG Yunjing, et al., 2015. Solvent extraction of rubidium and cesium from salt lake brine with t-BAMBP-kerosene solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25(1): 329-334.

References:

BAO Amin, QIAN Zhiqiang, ZHENG Hong, et al., 2017. Progress of separation and extraction methods for rare alkali metals rubidium and cesium[J]. Applied Chemical Industry, 46(7):

- LU Zhi, 2011. Separation and Extraction of rubidium from deep brine of structure marine of Ping Luo Ba[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- MAO Jingwen, YANG Zhongxi, XIE Giuqing, et al., 2019a. Critical minerals: International trends and thinking[J]. Mineral Deposits, 38(4): 689-698(in Chinese with English abstract).
- MAO Jingwen, YUAN Shunda, XIE Giuqing, et al., 2019b. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. Mineral Deposits, 38(5): 935-969(in Chinese with English abstract).
- MEI Yanxiong, PEI Rongfu, WEI Ran, et al., 2022. Critical minerals and energy resources security[J]. China Mining Magazine, 31(11): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources, 2023. National Mineral Reserves Statistical Table 2022[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources: 1-24(in Chinese).
- PAN Tong, CHEN Jianzhou, DING Chengwang, et al., 2023. Supernormal enrichment of lithium, rubidium and cesium and its development potential in the clay of Salt Lake of Qaidam Basin[J]. Geology in China, 50(6): 1925-1927(in Chinese with English abstract).
- PANG Dengke, 2020. Extraction and separation technology of rubidium and cesium in the Brine of La Guocuo Salt Lake brine[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lake Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- SUN Yan, WANG Denghong, WANG Chenghui, et al., 2019. Metallogenic regularity, new prospecting and guide direction of rubidium deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1231-1244(in Chinese with English abstract).
- USGS, 2024. Mineral Commodity Summaries January[R]. Reston VA: U. S. Geological Survey.
- WANG Chao, SUN Xiaohong, DING Xiaojian, et al., 2023. Research on the enrichment regularity of rubidium and cesium in Qarhan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 42(5): 701-710(in Chinese with English abstract).
- WANG Chunlian, HUANG Hua, WANG Jiuyi, et al., 2018. Geological features and metallogenic model of K- and Li-rich brine ore field in the Jiangling Depression[J]. Acta Geologica Sinica, 92(8): 1630-1646(in Chinese with English abstract).
- WANG He, XU Yigan, YAN Qinghe, et al., 2021. Research progress On Bailongshan pegmatite type lithium deposit, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 95(10): 3085-3098(in Chinese with English abstract).
- WANG Xuejing, GAO Shiyang, ZHOU Jianguo, et al., 2002. Study on the extraction and separation of K^+ , Rb^+ , Cs^+ with natural clinoptilolite from geothermal water in Tibet[J]. Journal of Salt Lake Research, 10(3): 31-37(in Chinese with English abstract).
- WU Changzhi, JIA Li, LEI Ruxiong, et al., 2021. Advances and general characteristics of the amazonite granite and related rubidium deposits in Central Asian orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(9): 2604-2628(in Chinese with English abstract).
- WU Jianjiang, 2023. Research progress of rubidium cesium separation and purification technology in China[J]. Xinjiang Non-ferrous Metals, 46(4): 23-24(in Chinese).
- XIE Shaolei, SHI Dong, ZHANG Yuze, et al., 2023. Research Status of Separation and Extraction of Rubidium and Cesium by Inorganic Adsorbents[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 47(7): 1020-1042(in Chinese with English abstract).
- YE Xiushen, 2009. Analysis and Adsorption Separation of Rubidium and Cesium in Chloride Type Brine[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lake Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shenghui, WANG Zhentao, LI Yongsheng, et al., 2022. List, application and global pattern of critical minerals of China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 42(5): 138-168(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiaowei, XIN Tianyu, LIU Jiaying, et al., 2021. Analysis on the current situation of global cesium resources and its comprehensive utilization technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 41(5): 7-11(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiufeng, TAN Xiumin, LI Chun, et al., 2019. Energy-efficient and simultaneous extraction of lithium, rubidium and cesium from lepidolite concentrate via sulfuric acid baking and water leaching[J]. Hydrometallurgy, 185: 244-249.
- ZHANG Xiufeng, YI Yuejun, TAN Xiumin, et al., 2021. Mechanism and kinetics characteristics of sulfuric acid baking process for extracting lithium, rubidium and cesium from lepidolite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 52(9): 3093-3102(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yuanyi, HAN Jingyi, GUO Lihe, et al., 2008. Characteristics and geological significance of mineralogy and fabrics for the hot spring cesium deposit occurring within the Targejia district, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(3): 519-530(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Mianping, WANG Qiuxia, DUO Ji, et al., 1995. A New Type of Hydrothermal Deposit: Cesium-bearing Geysirite in Tibet[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHOU Xiao, ZHAO Yuanyi, CHEN Wenxi, 2024. Rubidium and cesium resources current status, enrichment pattern and extraction technology in salt lakes of Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau, China[J]. Geological Review, 70(2): 705-716(in Chinese with English abstract).
- ZHU Jun, XU Yitong, GUO Mei, et al., 2022. Extraction of Lithium, Rubidium and Cesium from Lepidolite Using Composite Salt Roasting and Aqueous Leach Process[J]. Mining and metallurgical engineering, 42(2): 80-84(in Chinese with English abstract).