

取代苯酚类萃取剂在铷、铯分离回收中的研究进展

张甜甜^{1,2}, 林荣文², 余东海², 向绍基², 郑文³, 王成龙^{1*}

¹兰州交通大学, 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州

²中国科学院上海有机化学研究所, 先进氟氮材料全国重点实验室, 上海

³武汉朋和科技有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年6月18日; 录用日期: 2026年7月18日; 发布日期: 2026年7月27日

摘要

铷(Rb)和铯(Cs)作为重要的稀有碱金属资源, 在航空航天、新能源、电子信息及国防军工等高科技领域具有不可替代的战略价值。然而, 二者与大量化学性质相近的钾、钠等离子共存于盐湖卤水和矿石浸出液中, 分离提取难度极大。溶剂萃取法是当前铷铯分离的主流技术, 其中以4-叔丁基-2-(α -甲基苄基)苯酚(t-BAMBP)为代表的取代苯酚类萃取剂, 凭借其基于“体积效应”的卓越选择性、快速的反应动力学和良好的循环性能, 成为该领域的核心萃取剂。文章系统综述了以t-BAMBP为核心的取代苯酚类萃取剂在铷、铯分离领域的研究进展。首先, 梳理了铷铯资源的分布、性质与应用现状; 其次, 详细阐述了萃取化学的基础, 系统分析了萃取热力学与动力学机理; 再次, 重点介绍了从单级条件优化到多级逆流连续萃取的工艺开发策略, 特别关注了针对高钾/钠背景溶液的强化分离技术; 并探讨了稀释剂筛选、协同萃取体系设计、萃取剂合成与回收以及工艺过程中“固相化合物”问题在内的工艺优化与创新; 最后, 对比分析了不同技术路线的优缺点, 对该领域未来的研究方向如绿色协同体系开发、萃取剂结构设计以及多技术耦合进行了展望。

关键词

铷, 铯, 溶剂萃取, t-BAMBP, 取代苯酚, 协同萃取

Research Progress on Replacing Phenol-Based Extractants in the Rubidium and Cesium Separation and Recovery

*通讯作者。

文章引用: 张甜甜, 林荣文, 余东海, 向绍基, 郑文, 王成龙. 取代苯酚类萃取剂在铷、铯分离回收中的研究进展[J]. 材料科学, 2026, 16(7): 163-179. DOI: 10.12677/ms.2026.167165

Tiantian Zhang^{1,2}, Rongwen Lin², Donghai Yu², Shaoji Xiang², Wen Zheng³,
Chenglong Wang^{1*}

¹Key Lab of Opt-Electronic Technology and Intelligent Control of Ministry of Education,
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

²State Key Laboratory of Fluorine and Nitrogen Chemistry and Advanced Materials, Shanghai
Institute of Organic Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

³Wuhan Penghe Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: June 18, 2026; accepted: July 18, 2026; published: July 27, 2026

Abstract

Rubidium (Rb) and cesium (Cs), as important rare alkali metal resources, have irreplaceable strategic value in high-tech fields such as aerospace, new energy, electronic information, and the national defense and military industry. However, they are often associated with large amounts of chemically similar ions such as potassium and sodium in salt lake brine and ore leachate, making their separation and extraction extremely difficult. Solvent extraction is the current mainstream technology for rubidium-cesium separation. Among the various extractants, substituted phenols represented by 4-tert-butyl-2-(α -methylbenzyl)phenol (t-BAMPB) have become the core choice in this field due to their outstanding selectivity based on the “volume effect,” rapid reaction kinetics, and good recycling performance. This paper systematically reviews the research progress on substituted phenol extractants, with a focus on t-BAMPB. The article first outlines the distribution, properties, and current applications of rubidium and cesium resources; Second, it elaborates on the fundamentals of extraction chemistry and systematically analyzes the thermodynamic and kinetic mechanisms of extraction; Third, it focuses on process development strategies ranging from single-stage condition optimization to multi-stage counter-current continuous extraction, with particular attention to specific separation techniques for high potassium/sodium background solutions; Subsequently, it discusses process optimization and innovations, including diluent selection, design of synergistic extraction systems, synthesis and recovery of extractants, and the issue of “third phase” or solid precipitate formation in the process; Finally, it compares the advantages and disadvantages of different technological routes and looks ahead to future research directions in this field, such as the development of green synergistic systems, extractant structure design, and multi-technology coupling.

Keywords

Rubidium, Cesium, Solvent Extraction, t-BAMPB, Substituted Phenol, Synergistic Extraction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 铷、铯的战略地位与应用

铷和铯是元素周期表中第 IA 族的稀有碱金属元素，具有独特的物理化学性质。它们拥有极低的电离能(铯为 3.89 eV，铷为 4.18 eV)和优异的光电效应，使其在众多高科技领域展现出不可替代的应用价值[1][2]。在能源领域，铷、铯因其易离子化的特性，被广泛应用于磁流体发电、热离子转换发电以及离子推

进火箭等能量转换技术中[3]-[5]。在航天航空领域,铯原子钟以其极高的频率稳定性(误差可达数百万年不超过1秒)成为全球定位系统(GPS)和卫星导航的核心部件[6]-[8]。在光电领域,铷、铯化合物是光电倍增管、夜视仪、红外探测器等设备的关键材料[9][10]。此外,铷、铯及其化合物在特种玻璃[11]、催化剂[12]、生物医药[13]、钙钛矿太阳能电池[14]等领域也展现出广阔的应用前景[15]。

随着全球高科技产业的快速发展,铷、铯的战略地位日益凸显。美国、日本、加拿大、澳大利亚等国家及欧盟已相继将铷、铯列为战略性关键矿产资源或战略矿产清单[16]-[18]。据美国地质调查局(USGS)数据,2024年高纯度金属铯的价格已达128美元/克,且呈现持续上涨趋势[19]。因此,开发高效、经济的铷铯分离提取技术具有重要的战略意义和经济价值。

1.2. 铷、铯资源分布与赋存特征

铷和铯在地壳中的丰度相对较低,铷的含量约为 $2.8 \times 10^{-2}\%$,铯的含量约为 $1.2 \times 10^{-8}\% \sim 1 \times 10^{-5}\%$ [20][21]。二者至今未发现独立的工业矿物,通常以类质同相的形式伴生于锂云母、铯榴石、钾长石等硅酸盐矿物以及盐湖卤水、地下卤水中[22][23]。

锂云母是铷的主要载体矿物,中国约55%的铷资源赋存于锂云母中[24][25]。江西宜春、新疆可可托海等地是重要的铷铯矿产资源分布区。铯榴石(又称铯沸石)是含铯最丰富的矿物,其 Cs_2O 含量可达5%~32%,是提取铯的最重要工业原料[26][27]。加拿大Tanco矿区、津巴布韦Bikita矿区是全球最大的铯榴石生产基地[28][29]。此外,铁锂云母[30]、黑云母[31]、白云母[32]、钾长石[33]等矿物中也含有一定量的铷和铯。

盐湖卤水和地下卤水是铷、铯的重要液体资源。据估计,全球约90%以上的铷资源蕴藏于盐湖及地下卤水中[33]-[35]。美国索尔顿盐湖铷含量达169 mg/L、铯含量达20 mg/L[36];以色列死海铷含量约60 mg/L[37];中国青海察尔汗盐湖、西藏扎布耶盐湖、四川平落坝地下卤水等均含有丰富的铷、铯资源[38]-[40]。然而,卤水中铷、铯浓度通常较低(平均约10.8 mg/L和0.034 mg/L),且与大量 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等共存,分离提取难度极大[35][41]。

随着锂云母提锂产业的快速发展,提锂母液(尾液)中富集了相当量的铷和铯,成为重要的二次资源[42][43]。此外,含铷铯的尾矿、废渣、粉煤灰等也是潜在的可回收资源[44][45]。

1.3. 铷铯分离技术研发进展

由于铷、铯与同族元素钾、钠的物理化学性质极为相似,分离提纯一直是分离科学领域的难题。目前,主要的分离方法包括沉淀法、离子交换法、分步结晶法和溶剂萃取法[46]-[48]。

1.3.1. 沉淀法

利用大体积阴离子(如杂多酸、多卤化物、矾类等)与 Rb^+ 、 Cs^+ 形成难溶化合物实现分离[49][50]。该方法历史悠久,但存在沉淀组成不稳定、纯度低、流程复杂等缺点,目前已较少直接用于铷铯提取[51]。

1.3.2. 离子交换法

利用无机离子交换剂(如沸石等)或有机离子交换树脂对 Rb^+ 、 Cs^+ 的选择性吸附实现分离[52]-[55]。该方法尤其适用于低浓度铷铯溶液的富集,但存在交换容量有限、吸附剂机械强度差等问题[23][53]。

1.3.3. 分步结晶法

利用不同碱金属化合物之间溶解度的差异,通过多次溶解和结晶实现分离[54][55]。该法操作繁复、耗时长、分离效率低,目前已逐渐被其他方法替代[56]。

1.3.4. 溶剂萃取法

利用萃取剂选择性地将 Rb^+ 、 Cs^+ 从水相转移到有机相,实现与其他离子的分离[57][58]。该法具有反

应速度快、处理能力强、分离效率高、易于连续操作等优点，是当前铷铯分离研究的主流方向[59] [60]。铷铯分离技术对比结果如表 1 所示。

Table 1. Comparison of the main technical methods for rubidium-caesium separation
表 1. 铷铯分离主要技术方法对比

方法	原理	优点	缺点/现状
沉淀法	利用大体积阴离子(如杂多酸、多卤化物、矾类等)与 Rb ⁺ 、Cs ⁺ 形成难溶化合物实现分离。	操作简单、成本低廉。	1) 沉淀组成不稳定，产品纯度低，流程复杂。 2) 目前已较少直接用于铷铯提取。
离子交换法	利用无机离子交换剂(如沸石、杂多酸盐、亚铁氧化物、钛硅化合物等)或有机离子交换树脂对 Rb ⁺ 、Cs ⁺ 进行选择吸附。	特别适用于从低浓度铷铯溶液中进行富集。	交换容量有限，吸附剂机械强度差，解吸困难
分步结晶法	利用不同碱金属化合物之间溶解度的差异，通过反复的溶解和结晶过程实现分离。	操作简单、无需复杂设备	1) 操作繁琐，耗时长，分离效率低。 2) 已逐渐被其他方法替代。
溶剂萃取法	利用萃取剂选择性地将 Rb ⁺ 、Cs ⁺ 从水相转移到有机相，实现与其他离子的分离。	反应速度快，处理能力强，分离效率高，易于实现连续化操作。	是当前铷铯分离研究的主流方向。具有高选择性、低水溶性、高化学稳定性、良好反萃性能等优点。

在各种萃取剂中，取代苯酚类萃取剂(特别是 BAMPB 和 t-BAMPB)因其对碱金属离子的体积选择性(Cs⁺>Rb⁺>K⁺>Na⁺>Li⁺)、低水溶性、高化学稳定性和良好反萃性能，成为铷铯分离领域研究和应用最广泛的萃取剂[61]-[63]。自 1965 年美国橡树岭国家实验室首次报道 BAMPB 用于铯提取以来[64]，国内外学者围绕其萃取化学、热力学、动力学、工艺开发及过程强化等方面开展了大量系统深入的研究[65]-[68]。

2. 取代苯酚类萃取剂概述

2.1. 典型萃取剂：BAMPB 与 t-BAMPB

取代苯酚类萃取剂中最具代表性的是 4-仲丁基-2-(α -甲基苄基)苯酚(简称 BAMPB 或 s-BAMPB)和 4-叔丁基-2-(α -甲基苄基)苯酚(简称 t-BAMPB) [69] [70]。二者的分子结构如图 1 所示，其主要区别在于对位烷基：BAMPB 为仲丁基，t-BAMPB 为叔丁基。

1965 年，美国橡树岭国家实验室的 Egan 等[64]首次系统研究了 BAMPB 萃取碱金属的性能，发现其对铯具有极高的选择性。随后，Arnold 等[65]将 BAMPB 成功应用于铯榴石浸出液中铯的提取，建立了 Phenex 溶剂萃取工艺流程。1971 年，Rais 等[71]发现 t-BAMPB 与 BAMPB 具有相近的萃取性能，但由于叔丁基的合成原料更易得、萃取剂稳定性更好，t-BAMPB 逐渐取代 BAMPB 成为研究和应用的主流[72] [73]。

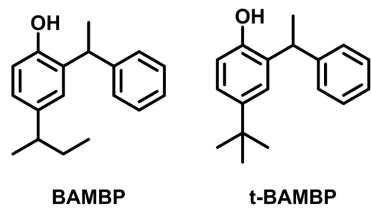


Figure 1. Structures of extractants for cesium and rubidium extraction
图 1. 用于铯和铷提取的萃取剂结构

BAMBP 和 t-BAMBP 的主要物理化学性质[74] [75]: 分子量 254.4; 密度约 1.00 g/mL (20℃); 沸点约 186℃ (6 mmHg); 在水中的溶解度极低(<0.01 g/L); 在常用有机稀释剂(煤油、二甲苯、环己烷等)中具有良好的溶解性。与 BAMBP 相比, t-BAMBP 具有更低的粘度和更高的化学稳定性, 在多级连续萃取中表现出更优异的循环性能[76] [77]。

2.2. 萃取剂结构与性能关系

取代苯酚的结构对其萃取性能有显著影响。Rodionova 等[78]系统研究了不同取代基对苯酚类萃取剂萃取铯性能的影响, 发现以下规律:

- 1) 邻位取代基: 酚的 2,6 位同时有取代基时, 由于严重的空间位阻, 酚羟基的 H⁺难以解离, 萃取能力显著降低。2-位为 α-甲苄基时具有最佳的萃取性能[79]。
- 2) 对位烷基链: 对位烷基链的长度和支化度对萃取性能有重要影响。对位烷基碳链从 C1 增加到 C8 时, DCs 和 DRb 均随碳链长度增加而增大[80]。支链烷基(如叔丁基)比直链烷基(如仲丁基)能提供更好的油溶性和选择性[81]。
- 3) 电子效应: 酚羟基 O 原子的电子云密度影响其与金属离子的配位能力。供电子基团(如烷基)能提高 O 原子电子云密度, 增强配位能力; 吸电子基团(如卤素)则相反[82]。

刘瑞明等[83]进一步合成了多种新型取代苯酚萃取剂, 包括 4-叔戊基-2-(α-甲苄基)苯酚、4-甲基-2-(α-甲苄基)苯酚、4-乙基-2-(α-甲苄基)苯酚、4-异丙基-2-(α-甲苄基)苯酚、4-氟-2-(α-甲苄基)苯酚等, 系统研究了其对 K⁺、Rb⁺、Cs⁺的萃取性能, 发现对位为叔丁基时萃取性能仍为最优。

2.3. 稀释剂的选择与效应

稀释剂在溶剂萃取过程中不仅作为萃取剂的溶剂, 还影响萃取剂的聚集状态、萃合物的溶解度和萃取动力学[84] [85]。杨玲等[84]系统比较了磺化煤油、二甲苯和二乙苯对 t-BAMBP 萃取铷铯的影响, 结果如表 2 所示。

Table 2. Effect of different dilutants on the extraction of rubidium and cesium by t-BAMBP [86]
表 2. 不同稀释剂对 t-BAMBP 萃取铷铯的影响[86]

稀释剂	DRb	DCs	β(Cs/Rb)
磺化煤油	1.19	27.33	22.97
二甲苯	1.35	26.42	19.57
二乙苯	0.06	1.89	31.50

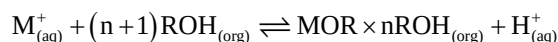
研究表明, 磺化煤油虽然分配比较高, 但在多级萃取过程中易产生乳化现象, 严重影响相分离; 二甲苯和二乙苯分相快、无乳化, 其中二甲苯提供更高的铯萃取率, 而二乙苯提供更高的铯/铷分离系数[86][87]。Xing 等[88]推荐使用二甲苯作为稀释剂, 其较低的介电常数能抑制 t-BAMBP 的解离, 使其主要以中性分子形式存在, 从而不利于形成需要离子参与或诱导的氢键聚合结构, 避免乳化。工业实践中, 综合考虑毒性、成本、安全性和萃取性能, 磺化煤油和二甲苯是应用最广泛的稀释剂[85]。

刘瑞明[83]发现, 非极性环己烷作为稀释剂时, t-BAMBP 对铷、铯的萃取总量最大, 且分相良好。王嘉伟等[62]研究了 t-BAMBP/二甲苯/煤油体系中 t-BAMBP 的溶解损失行为, 发现在强碱性条件下(pH > 11), t-BAMBP 因形成酚盐而溶解度剧增, 提出了通过 pH 调节回收萃取剂的策略。

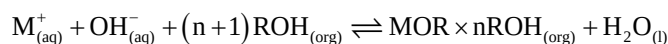
3. 萃取化学基础

3.1. 萃取反应机理

t-BAMBP 是一种弱酸性萃取剂($\text{pK}_a \approx 10$), 在碱性条件下, 酚羟基上的氢离子(H^+)得以解离, 与溶液中的碱金属离子(M^+)发生交换, 形成疏水性的苯酚盐络合物并进入有机相[89]。经典的萃取反应可表示为[90]:

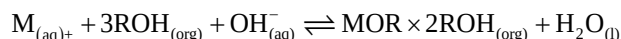


在碱性介质中, 由于 OH^- 的参与, 反应可写为:



大量研究表明, 在常规萃取条件下(有机相中 $c(\text{t-BAMBP}) > 0.1 \text{ M}$), t-BAMBP 主要以二聚体形式存在[91][92]。Egan 等[64]通过红外光谱研究证实, BAMBP 在 CCl_4 中二聚体是主要的聚集形式, 单体仅在极稀溶液中存在。

通过斜率法系统分析萃取剂浓度和碱度对分配比(D)的影响, 可以确定萃合物的组成[93]。赵琳等[94]在研究 t-BAMBP (以二甲苯为稀释剂)萃取铷、钾时发现, $\lg D$ 对 $\lg[\text{t-BAMBP}]$ 的斜率接近 3, 对 $\lg[\text{OH}^-]$ 的斜率接近 1, 确定萃合物的组成为 $\text{MOR} \cdot 2\text{ROH}$ (即 M^+ 与 3 个 ROH 分子配位), 萃取反应式为:



类似的研究在陈正炎等[87]和刘雪颖等[95]的工作中也得到了证实。吕英伟等[96]从高浓度氯化铷浸出液中选择性提取铯, 通过斜率法确定 Cs^+ 与 t-BAMBP 的配位比为 1:3, 萃合物组成为 $\text{CsOR} \cdot 2\text{ROH}$ 。值得注意的是, 在高负载条件下(t-BAMBP/Cs 摩尔比接近 4:1), 萃合物组成可能为 $\text{CsOR} \cdot 3\text{ROH}$ [64]。

3.2. 萃取热力学

萃取热力学是研究取代酚类萃取剂从碱性溶液中萃取碱金属离子过程的基础。通过考察分配比与温度的关系, 测定萃取反应的焓变(ΔH)、熵变(ΔS)与吉布斯自由能变(ΔG), 可明确萃取反应的热效应特征与自发进行的方向, 为优化工艺条件、理解萃取选择性差异的来源提供理论依据[97]。

3.2.1. 焓变(ΔH)

大量研究表明, 取代苯酚萃取铷、铯的反应是放热过程。陈正炎等[87]计算得到 t-BAMBP 萃取铯的 $\Delta H = -26.69 \text{ kJ/mol}$ 。赵琳[94]计算得到 t-BAMBP 萃取铷的 $\Delta H = -22.28 \text{ kJ/mol}$, 萃取钾的 $\Delta H = -6.38 \text{ kJ/mol}$ 。Pang 等[90]计算得到皂化 t-BAMBP 萃取铯的 $\Delta H = -35.84 \text{ kJ/mol}$ 。放热性质表明, 降低温度有利于萃取反应正向进行, 这为低温萃取工艺提供了理论依据。

3.2.2. 吉布斯自由能变(ΔG)

$\Delta G = -RT \ln K$, 负值表明反应可自发进行。赵琳[94]计算得到 $\Delta G_{Rb} = -2.69 \text{ kJ/mol}$, $\Delta G_K = -1.35 \text{ kJ/mol}$ 。说明 t-BAMBP 对铷的萃取能力大于钾。吕英伟等[97]计算得到 t-BAMBP 萃取铯的 $\Delta G = -49.6 \text{ kJ/mol}$ 。Rozen 等[98]系统研究了 BAMBP 对 Cs、Rb、K、Na、Li 的萃取热力学, 发现 ΔG 的绝对值随离子半径增大而增大($Cs > Rb > K > Na > Li$), 这与萃取选择性一致。

3.2.3. 熵变(ΔS)

萃取过程的熵变通常为负值[95], 表明萃取反应导致体系混乱度减少。赵琳等[94]计算得到 $\Delta S_{Rb} = -66.83 \text{ J/(K} \cdot \text{mol)}$, $\Delta S_K = -17.16 \text{ J/(K} \cdot \text{mol)}$; Rozen 等[98]认为, 熵减主要来源于萃取剂分子从自由态转变为与金属离子配位的束缚态, 以及溶剂化结构的重排。 ΔS_{Rb} 绝对值更大, 说明其萃合物结构更加有序。

3.2.4. 半萃取 pH 值($pH_{0.5}$)

$pH_{0.5}$ 是分配比 $D = 1$ 时的平衡 pH 值, 是衡量萃取剂萃取能力的重要参数。萃取剂的萃取能力越强, $pH_{0.5}$ 值越低。孙瑞毅等[99]在研究新型膦酸萃取剂时指出, $pH_{0.5}$ 可用于评估萃取剂对重稀土的萃取能力。类似地, 对于 t-BAMBP, 对铯的 $pH_{0.5}$ 约为 11~12, 对铷约为 12~13, 对钾大于 13 [95]。

3.3. 萃取动力学

尽管 t-BAMBP 萃取反应达到平衡的时间很短(通常 1~5 分钟), 但其动力学机理的研究对于反应器设计和过程强化具有指导意义[100]。

3.3.1. 反应速率与级数

赵琳等[94]采用恒界面池法, 系统研究了 t-BAMBP/二甲苯体系萃取铷的动力学。通过考察初始 Rb^+ 浓度对萃取速率的影响, 发现萃取速率与 Rb^+ 浓度呈一级反应关系(反应级数为 1)。萃取速率与 t-BAMBP 浓度也呈一级关系, 与 NaOH 浓度呈正相关。

3.3.2. 控制模式判别

通过考察搅拌速率、相界面积、温度等因素对萃取速率的影响, 可以判断萃取过程的控制类型[101]。赵琳[94]的实验结果表明:

- 1) 搅拌速率从 100 r/min 增加到 500 r/min 时, 萃取速率显著增加, 说明扩散过程有贡献;
- 2) 相界面积增大时萃取速率线性增加, 但直线不通过原点, 表明界面化学反应也有贡献;
- 3) 表观活化能 $E_a = 31.42 \text{ kJ/mol}$, 介于 20~42 kJ/mol 之间。

综合以上结果, t-BAMBP 萃取铷的过程属于扩散和界面化学反应混合控制模式, 主要的扩散阻力区集中在水相, 萃取化学反应发生在相界面处[102]。该结论与黄东等[100]采用单液滴法的研究结果一致。

3.3.3. 速率方程

基于以上分析, 赵琳[94]建立了 t-BAMBP 萃取铷的动力学模型:

$$R = \frac{[Rb^+]_{(a),0}}{\left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2 \cdot [ROH]_{(o),0}} \right)}$$

其公式为 t-BAMBP 在 RbCl-KCl 混合溶液中萃取 Rb^+ 的萃取速率数学模型。 K_1 为 Rb^+ 在水相中的传质系数, K_2 为两相界面处的萃取反应速率系数。下标(a),0 为萃取反应刚开始发生时水相的初始浓度, 下标(o),0 为萃取反应刚开始发生时有机相的初始浓度。

4. 萃取工艺开发与优化

4.1. 单级萃取条件优化

单级萃取是工艺开发的基础。诸多研究表明,影响萃取效果的关键因素包括:料液碱度(OH^- 浓度)、萃取剂浓度、相比(O/A)、温度、时间以及稀释剂种类[86] [103]-[105]等。

4.1.1. 碱度的影响

由于萃取反应消耗 OH^- , 提高料液碱度是推动反应正向进行的最有效手段。杨玲等[84]和吴建江[105]的研究均表明,铷、铯的分配比随碱度(如 NaOH 浓度)的增加而显著增加。从高盐废液中萃取铯时,最佳 pH 约为 12.5 [104]。

吴建江等[105]采用 t-BAMBP/磺化煤油体系从盐湖卤水中萃取铷、铯,发现在 NaOH 浓度为 0.1~1.0 mol/L 范围内,萃取率随碱度增加而增加,但超过 1.0 mol/L 后增加趋缓。Li 等[106]在合成卤水体系中得到了类似的规律,最佳碱度为 0.1 mol/L。Xing 等[63]从含铷矿石碱浸液中萃取铷,最佳 NaOH 浓度为 150 g/L (约 3.75 mol/L),这是因为该料液中铷浓度较高(0.47 g/L),需要更高的碱度驱动萃取。

然而,过高的碱度会带来负面影响:一是增加试剂成本;二是可能加剧 t-BAMBP 的溶损[107];三是对于高镁卤水,强碱可能导致 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉淀生成,影响操作[84]。因此,优化碱度时需综合考虑萃取效率、经济性和操作可行性。

4.1.2. 萃取剂浓度的影响

增加 t-BAMBP 浓度直接提高了有机相的萃取容量。杨玲等[84]发现,当 t-BAMBP 浓度从 0.5 mol/L 增至 1.5 mol/L 时,铷、铯的萃取率均显著上升。张秀峰等[20]从硫酸盐溶液中萃取铷, t-BAMBP 浓度从 0.7 增至 1.2 mol/L 时,铷萃取率从 62%增至 68%。吕英伟等[96]从高浓度氯化铷浸出液中选择性萃取铯, t-BAMBP 浓度从 0.5 增至 1.5 mol/L 时,铯萃取率从 46%增至 98%。

然而,浓度过高会增加有机相粘度,影响分相速度和循环使用性能[84]。综合考虑,1.0 mol/L 是较为常用的浓度[108]。在实际工艺中,应根据料液中铷铯含量和处理量选择合适的萃取剂浓度。

4.1.3. 相比(O/A)的影响

相比的选择需要在单级萃取率和富集倍数之间平衡。通常,增大 O/A 比有利于提高萃取率,但会降低有机相中金属离子的负载浓度[109]。

谢捷等[110]从高钾(>80 g/L)、高钠(>86 g/L)溶液中萃取铷、铯,在 O/A = 3:1 时铷、铯萃取率分别达到 99%和 98%。吕英伟等[96]在处理高浓度氯化铷浸出液时,采用 O/A = 1:4 (有机相体积较小)实现了铯的选择性萃取(萃取率 85%,铷共萃率仅 16%),同时获得了较高的有机相负载浓度。

在多数工艺中,相比选择范围在 1:4 到 3:1 之间[111] [112]。相比的优化需综合考虑原料处理量、产品浓度要求和萃取剂用量。

4.1.4. 温度的影响

鉴于萃取反应的放热特性,低温操作普遍有利。杨玲等[84]发现,温度从 23℃升高到 50℃时,铷、铯的分配比显著下降,且对铷的影响更明显。王金良等[113]在分离盐湖卤水中的铯、铷时,采用 5℃的低温条件以最大限度地提升分离系数。

然而,低温会增加能耗和操作成本,因此室温(约 25℃)操作因其经济性而被多数研究所采用[114]。对于特定高选择性分离要求,可考虑低温操作。

4.1.5. 时间的影响

t-BAMBP 萃取反应非常快速。杨玲等[84]发现,振荡时间在 5 min 内即可达到平衡,继续延长时间

对萃取率影响不大。谢捷等[110]发现萃取时间仅需 1 min 即可达到平衡。吕英伟等[96]也得到类似结论, 确定最佳萃取时间为 1 min。

这种快速特性有利于工业连续化操作, 可减小萃取器的体积和停留时间, 提高处理效率。

4.2. 多级逆流萃取工艺

单级萃取的效率有限, 工业上普遍采用多级逆流萃取流程以实现高效分离与富集[35]。多级逆流萃取使有机相与水相逆向接触, 可以用较少的萃取剂达到较高的萃取率。

4.2.1. 从矿石浸出液中提取铷、铯

吴建江等[105]采用 t-BAMBP/磺化煤油体系对盐湖卤水进行 5 级逆流萃取, 铷、铯的萃取率分别达到 95%和 99%。鲁奥林等[115]采用 t-BAMBP/磺化煤油体系对锂云母硫酸焙烧浸出液中的铯进行萃取, 经 4 级逆流萃取, 铯萃取率达到 99%。

吕英伟等[96]从高浓度氯化铷浸出液中选择性提取铯(料液含 Cs^+ 0.34 g/L、 Rb^+ 6 g/L、 K^+ 23 g/L), 通过优化条件在 $\text{O/A} = 1:4$ 下进行 5 级逆流萃取, 铯累积萃取率达到 99%, 而铷的共萃率仅为 16%。随后, 利用铷、铯与 t-BAMBP 结合稳定性的差异, 采用 0.1 mol/L 稀盐酸进行 4 级逆流洗涤, 成功洗脱了 99% 的共萃铷, 铯损失仅 5%。最后用 0.05 mol/L 极稀的 HCl 进行 2 级逆流反萃, 铯反萃率达 99%。该工作展示了如何通过精细调控洗涤条件, 在萃取段后进一步纯化负载有机相, 从而获得超高纯度的铯产品。

4.2.2. 从高钾/钠背景溶液中分离铷、铯

谢捷等[110]针对极端高盐体系(K^+ 82 g/L、 Na^+ 86 g/L、 Rb^+ 6 g/L、 Cs^+ 7 g/L), 系统研究了 t-BAMBP 的萃取性能。在优化条件下(NaOH 0.5 mol/L、t-BAMBP 1 mol/L、 $\text{O/A} = 3:1$ 、时间 1 min), 通过 5 级逆流萃取, Cs^+ 和 Rb^+ 的萃取率分别达到 99%和 98%, 但约有 19%的 K^+ 被共萃进入有机相。为解决这一问题, 他们设计了 5 级逆流水洗工序, 用去离子水在 $\text{O/A} = 2:1$ 下成功洗脱了 99%的 K^+ , 而铷、铯损失极少。最后, 通过 2 级逆流反萃(0.5 mol/L HCl, $\text{O/A} = 3:1$), >99%的铷、铯被回收。该研究完整展示了“萃取 - 洗涤 - 反萃”的全流程工艺设计思路, 是处理复杂料液的典范。

4.2.3. 从提锂母液中回收铷、铯

锂云母提锂母液是重要的铷铯二次资源[116] [117]。陈正炎等[87]采用 t-BAMBP/二乙苯/磺化煤油体系从锂云母提锂母液中回收铯, 制得纯度 > 99%的氯化铯产品, 铯收率达 96%。

张秀峰等[20]从锂云母硫酸焙烧浸出液中先分离铯, 然后再从铯分离后的溶液中提取铷。在优化条件下(碱度 0.7 mol/L、t-BAMBP 1 mol/L、 $\text{O/A} = 3:1$), 经 4 级逆流萃取, 铷萃取率达 97%, 共萃钾为 17%。负载有机相经 6 级逆流水洗洗脱 96%的钾, 铷损失仅 7.25%。最后用 0.1 mol/L H_2SO_4 反萃, 获得纯度 98.17%的 Rb_2SO_4 产品。该工作建立了一条从锂云母中综合回收锂、铯、铷的完整工艺路线。

安莲英等[118]采用 t-BAMBP/D80 体系从四川平落高钾卤水中提取铷, 经多级逆流萃取 - 洗涤 - 反萃, 获得了纯度 97%的 RbCl , 铷总萃取率达 92%。

4.3. “萃取 - 洗涤 - 反萃”全流程设计

工业上成熟的铷铯萃取分离工艺通常包括三个工段: 萃取、洗涤和反萃[47]。

萃取段: 目标是将铷、铯从水相转移到有机相。关键在于选择合适的条件(碱度、萃取剂浓度、相比、级数)以实现高萃取率并控制共萃杂质质量。

洗涤段: 用适当的洗涤剂(通常是稀酸或去离子水)去除负载有机相中的共萃杂质(主要是 K^+)。洗涤剂的选择和相比控制至关重要——既要充分洗脱杂质, 又要尽量减少目标离子(Rb^+ 、 Cs^+)的损失。吕英伟等

[96]用 0.1 mol/L HCl 在 O/A = 3:1 下 4 级逆流洗涤, 实现了 99%的 Rb⁺洗脱率, Cs⁺损失仅 5%。谢捷等[110]用去离子水洗脱, 同样取得了良好效果。

反萃段: 用反萃剂(通常是稀酸)将铷、铯从有机相转移到水相, 实现富集和产品制备。由于萃取反应的可逆性, 稀酸即可有效反萃[23]。吕英伟等[96]用 5×10^{-2} mol/L HCl 在 O/A = 4:1 下 2 级逆流反萃, Cs⁺反萃率达 99%。谢捷等[110]用 0.5 mol/L HCl 在 O/A = 3:1 下 2 级逆流反萃, Cs⁺和 Rb⁺反萃率均>99%。

全流程设计的关键在于各工段条件的协调优化, 以实现高收率、高纯度、低成本和良好的操作稳定性。

5. 工艺创新与拓展

5.1. 皂化预处理工艺

传统 t-BAMBP 体系需在高碱度(pH > 12)下操作, 带来碱消耗大、设备腐蚀和萃取剂溶损等问题[72]。为解决这一问题, 研究者提出了皂化预处理工艺[73]。

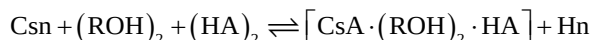
王金亮等[113]用 NaOH 对 t-BAMBP/十二烷溶液进行部分皂化后直接萃取盐湖卤水中的铯、铷。结果表明, 该工艺与用 NaOH 调节料液碱度的传统工艺相比, 所需 t-BAMBP 浓度较低, 且皂化剂可重复使用。Pang 等[90]系统研究了皂化 t-BAMBP 萃取铯、铷的机理, 提出了皂化 - 萃取 - 洗涤 - 反萃的全流程。皂化阶段 Na⁺从水相转移到有机相, 反萃取后 Na⁺脱离, t-BAMBP 再生。该工艺避免了向料液加碱, 从源头解决了碱性尾液问题, 但对有机相的循环稳定性有一定影响。

5.2. 协同萃取体系

为实现在近中性或弱碱性条件下的高效萃取, 协同萃取策略展现出巨大潜力[22]。

5.2.1. t-BAMBP/P204 协同体系

美国橡树岭国家实验室 Zingaro 等[77]早在 1967 年就发现, 二-(2-乙基己基)磷酸(D2EHPA, 即 P204)与 BAMBP 存在协同效应, 可从非碱性溶液中萃取铯。近期, 程鑫雨等[119]将此协同体系应用于盐湖卤水提铯, 使用 1.0 mol/L t-BAMBP 与 5×10^{-2} mol/L P204 的协同体系, 在原始 pH (约 9)的卤水中, 通过三级逆流萃取, 铯的单级萃取率即达到 92%, 萃余液 pH = 6~7, 无需处理即可排放。机理研究表明, P204 的 P=O 官能团与 t-BAMBP 的酚羟基形成氢键, 调节了 t-BAMBP 的电子云密度, 使其酚羟基在较低 pH 下更易解离, 从而促进了阳离子交换反应的进行。通过斜率法确定了萃取反应:



5.2.2. t-BAMBP/Cyanex272 协同体系

鲁亚男等[120]研究了 t-BAMBP 与 Cyanex272 的协同效应。该协同体系同样在弱碱性(pH~10.6)条件下表现出优异的铯萃取性能。在优化条件下(t-BAMBP 0.8 mol/L、Cyanex272 0.04 mol/L、pH 10.58、O/A = 1:1), 单级铯萃取率达 76%, 分离系数 $\beta_{(\text{Cs}/\text{Li})} = 2907$ 、 $\beta_{(\text{Cs}/\text{Na})} = 162$ 、 $\beta_{(\text{Cs}/\text{K})} = 246$ 、 $\beta_{(\text{Cs}/\text{Rb})} = 16$ 。FT-IR 和 ¹H NMR 分析证实, Cyanex272 与 t-BAMBP 发生了氢键相互作用, 活化了酚羟基。

5.2.3. t-BAMBP/TiOA 协同体系

Ai 等[121]开发了 t-BAMBP 与三异辛胺(TiOA)的二元协同体系, 用于从锂云母提锂废液中分离铯和铷。在优化条件下, 分离系数 $\beta_{(\text{Cs}/\text{Rb})}$ 达到 57。通过 DFT 计算和 XPS 表征, 证实了 TiOA 与 t-BAMBP 之间的氢键作用是协同效应的来源。经三级逆流萃取, 萃余液中 Cs⁺浓度仅 4 mg/L, $\beta_{(\text{Cs}/\text{Rb})}$ 达 668, 产品 CsCl 和 RbCl 纯度分别 99.9%和 99.6%。

这些协同萃取体系的研究, 为实现铷、铯的“绿色”萃取开辟了新路径。

5.3. 新型萃取剂合成与评估

除了对 t-BAMBP 进行工艺改进,设计合成新型取代苯酚萃取剂也是重要研究方向[122]。刘瑞明等[83]以对叔戊基苯酚和苯乙烯为原料,浓磷酸催化合成了 4-叔戊基-2-(α -甲苄基)苯酚,产率可达 58%。通过改变烷基链的长度和支化度,可以调节萃取剂的亲脂性和空间位阻,进而影响其对铷、铯的选择性。

蒋颖[123]对 t-BAMBP 合成过程中的副产物进行了系统研究,发现 2-苄基苯酚也具有较好的铯萃取能力。进一步研究其机理表明,2-苄基苯酚在有机相中以二聚体形式存在,萃取平衡常数 K 高达 140。这一发现不仅对 t-BAMBP 粗产品的质量控制在具有指导意义,也为开发新型、廉价、高效的取代苯酚萃取剂提供了思路。

5.4. 萃取剂回收与工艺经济性

萃取剂的价格和使用寿命是决定工艺经济性的关键[124]。王嘉伟等[62]明确指出,在强碱性条件下,t-BAMBP 会因形成酚盐而大量溶解于水相,这是萃取剂损失的主要途径。基于此,他们提出了一种高效的回收策略:用硫酸将萃余液的 pH 调至酸性或弱碱性($\text{pH} < 11$),使 t-BAMBP 从离子态(PhO^-)转变回分子态(PhOH),从而大大降低其水溶性,再用煤油等溶剂进行萃取回收。经过 15 个循环的富集回收,t-BAMBP 在煤油中的浓度可被富集至 14% (体积分数),回收效率保持在 90%以上,且回收的萃取剂对铷、铯的萃取性能与新萃取剂无显著差异。这项研究为建立闭环的、经济可行的萃取工艺提供了关键技术支撑。

5.5. 萃取过程中的“固相析出”问题

在多级萃取过程中,谢捷等[110]发现有机相中会出现“固相析出”,严重干扰萃取操作。通过 XRD、FT-IR 和 ICP-MS 分析,该固相化合物的主要成分为 NaCl 和 KCl,以及少量与 t-BAMBP 结合的 Rb 和 Cs。研究发现,当有机相中 t-BAMBP/金属摩尔比小于 4 时,固相化合物开始出现,且随摩尔比降低而增加。红外光谱分析表明,固相化合物的形成与分子间氢键有关,导致有机相熔点升高。因此,在工艺设计中应保持足够的 t-BAMBP/金属摩尔比(>4),以避免固相化合物的生成。

5.6. 相图分离与结晶法

除溶剂萃取外,相图分析和结晶法也是铷、铯分离的重要手段[125]。曾英等[126]首次建立了 338 K 下三元体系($\text{NaNO}_3 + \text{CsNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$)的相图,开发了从混合溶液中回收硝酸铯的结晶分离工艺。Chen 等[127]研究了 323 K 下四元体系 K^+ 、 Rb^+ 、 $\text{Cs}^+//\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 的稳定相平衡,发现体系中生成了三种固溶体,为硫酸盐体系中铷、铯的分离提供了理论依据。

Fan 等[128]提出了“加热溶解-冷却结晶”(DHCC)工艺,通过控制结晶动力学,获得了比热力学平衡预期更高的分离因子, $\beta_{(\text{Cs/Rb})}$ 和 $\beta_{(\text{Rb/K})}$ 分别达到 48 和 22,经 3~4 次重结晶可获得纯度 $> 99.9\%$ 的铯矾和铷矾。

Chen 和 Hu [127]创新性地提出了一种“晶体熟化微萃取”(CRME)策略,直接从固体 KCl 盐中原位提取铷,利用 Ostwald 熟化现象驱动 Rb^+ 从 KCl 晶格中迁移到 t-BAMBP 有机相。与液相萃取相比,该策略实现了 97% 的能耗降低、22% 的回收效率提高和 13 倍的 Rb/K 分离因子提升,为从固体盐中提取稀散元素开辟了新途径。

6. 问题与展望

6.1. 当前面临的挑战

尽管以 t-BAMBP 为代表的取代苯酚类萃取剂在铷、铯分离领域取得了显著成就,但仍面临以下挑战

(表 3):

Table 3. The main challenges of t-BAMBP in extracting rubidium and cesium
表 3. t-BAMBP 萃取铷铯的主要挑战

挑战类别	具体表现
高碱耗与环境污染	传统工艺需在高碱度(pH > 12)下操作，碱耗大、成本高，且产生强碱性萃余液，处理难度大、环境风险高[119]。
萃取剂溶损	强碱性条件下 t-BAMBP 易形成酚盐而溶解损失，增加成本并影响工艺稳定性[62]。
选择性不足	虽然 t-BAMBP 对 Cs/Rb/K 的选择性较高，但对于 Rb/K 的分离系数仍不够理想，且对性质极为相似的 Cs/Rb 分离更具挑战性。
乳化与三相问题	多级萃取过程中可能出现乳化或固相化合物，影响操作稳定性和分离效率[110]。
资源综合利用率低	现有工艺多聚焦于单一元素(Cs 或 Rb)的提取，对锂、钾、硼等共生资源的综合利用不足。

6.2. 未来研究方向

未来提升铷铯分离效果的关键路径包括：深化绿色协同萃取体系；融合超选择性材料与智能控制；实现萃取剂分子结构的精准设计；强化盐湖资源综合流程整合；探索电化学辅助萃取等新型技术。

7. 结论

以 t-BAMBP 为代表的取代苯酚类萃取剂，凭借其基于“体积效应”的卓越选择性、快速的反应动力学和成熟的工艺路线，已成为目前从复杂溶液中分离回收铷、铯的最有效方法。通过对萃取机理的深入认识，研究者成功开发了针对不同料液特性的高效多级逆流萃取工艺。同时，为解决传统工艺高碱耗、高污染问题而发展的协同萃取体系，以及为降低工艺成本而建立的萃取剂回收技术，都推动了该领域的显著进步。

未来，通过绿色协同体系的深入开发、新型萃取剂的分子设计、智能化过程控制以及多技术耦合，有望突破现有瓶颈，实现铷、铯资源的经济、绿色、高效利用，为我国战略性新兴产业的可持续发展提供坚实的材料保障。

参考文献

[1] Gao, L., Ma, G.H., Zheng, Y., Tang, Y., Xie, G., Yu, J., *et al.* (2020) Research Trends on Separation and Extraction of Rare Alkali Metal from Salt Lake Brine: Rubidium and Cesium. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, **38**, 753-776. <https://doi.org/10.1080/07366299.2020.1802820>

[2] Niu, H., Yu, M., Mubula, Y., Zeng, L., Xu, K., Zhu, Z., *et al.* (2025) Extraction of Rubidium and Cesium from a Variety of Resources: A Review. *Materials*, **18**, Article No. 3378. <https://doi.org/10.3390/ma18143378>

[3] Saliba, M., Matsui, T., Domanski, K., Seo, J., Ummadisingu, A., Zakeeruddin, S.M., *et al.* (2016) Incorporation of Rubidium Cations into Perovskite Solar Cells Improves Photovoltaic Performance. *Science*, **354**, 206-209. <https://doi.org/10.1126/science.aah5557>

[4] Visconti, P.J., Slevin, J.A. and Rubin, K. (1971) Absolute Total Cross Sections for the Scattering of Low-Energy Electrons by Rubidium, Cesium, and Potassium. *Physical Review A*, **3**, 1310-1317. <https://doi.org/10.1103/physreva.3.1310>

[5] Formichella, V., Camparo, J. and Tavella, P. (2018) Mitigation of Lamplight-Induced Frequency Jumps in Space Rubidium Clocks. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, **65**, 911-918. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2018.2792779>

[6] Shi, T.T., Wei, Q., Qin, X., Liu, Z., Chen, K., Cao, S., *et al.* (2024) Dual-Frequency Optical-Microwave Atomic Clocks

- Based on Cesium Atoms. *Photonics Research*, **12**, 1972-1980. <https://doi.org/10.1364/prj.528942>
- [7] Liu, C., Chen, S., Chen, Z., Li, L., Xu, S., Li, Y., *et al.* (2021) Improving the Short-Term Frequency Stability of a Magnetic-State-Selected Cesium Beam Clock with Optical Detection. *Review of Scientific Instruments*, **92**, Article ID: 033001. <https://doi.org/10.1063/5.0046575>
 - [8] Kaczorowska, M.A. (2024) Novel and Sustainable Materials for the Separation of Lithium, Rubidium, and Cesium Ions from Aqueous Solutions in Adsorption Processes—A Review. *Materials*, **17**, Article No. 6158. <https://doi.org/10.3390/ma17246158>
 - [9] Zhang, M., Yun, J.S., Ma, Q., Zheng, J., Lau, C.F.J., Deng, X., *et al.* (2017) High-Efficiency Rubidium-Incorporated Perovskite Solar Cells by Gas Quenching. *ACS Energy Letters*, **2**, 438-444. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.6b00697>
 - [10] Liu, D., Peng, H., Zeng, H. and Sa, R. (2021) A Promising All-Inorganic Double Perovskite Rb_2TiBr_6 for Photovoltaic Applications: Insight from First-Principles Calculations. *Journal of Solid State Chemistry*, **303**, Article ID: 122473. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122473>
 - [11] Ivanova, Z.G., Zavadil, J., Kostka, P., Djouama, T. and Reinfelde, M. (2017) Photoluminescence Properties of Er-Doped Ge-In(Ga)-S Glasses Modified by Caesium Halides. *Physica Status Solidi (b)*, **254**, Article ID: 1600662. <https://doi.org/10.1002/pssb.201600662>
 - [12] Haider, M.H., Dummer, N.F., Zhang, D., Miedziak, P., Davies, T.E., Taylor, S.H., *et al.* (2012) Rubidium- and Caesium-Doped Silicotungstic Acid Catalysts Supported on Alumina for the Catalytic Dehydration of Glycerol to Acrolein. *Journal of Catalysis*, **286**, 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2011.11.004>
 - [13] Xu, X.L., Singh, H.P., Wang, L., Qi, D., Poulos, B.K., Abramson, D.H., *et al.* (2014) Rb Suppresses Human Cone-Precursor-Derived Retinoblastoma Tumours. *Nature*, **514**, 385-388. <https://doi.org/10.1038/nature13813>
 - [14] Lu, J., Dreisinger, D., McElroy, R., Oloman, C., Downing, B. and Trueman, D. (2022) Cesium Extraction from the Taron Deposit. *Hydrometallurgy*, **210**, Article ID: 105823. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105823>
 - [15] Pitz, G.A., Stalnaker, D.M., Guild, E.M., Oliker, B.Q., Moran, P.J., Townsend, S.W., *et al.* (2016) Advancements in Flowing Diode Pumped Alkali Lasers. *SPIE Proceedings*, **9729**, Article ID: 972902. <https://doi.org/10.1117/12.2217078>
 - [16] 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等. 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, 2019, 38(5): 935-969.
 - [17] 梅燕雄, 裴荣富, 魏然, 等. 关键矿产与能源资源安全[J]. 中国矿业, 2022, 31(11): 1-8.
 - [18] 赵亮, 王蒙蒙, 夏永高, 等. 铷和铯离子的分离提取技术研究进展[J]. 盐湖研究, 2024, 32(5): 1-9.
 - [19] U.S. Geological Survey (2025) Mineral Commodity Summaries 2025. USGS.
 - [20] 张秀峰, 张锦程, 谭秀民, 等. 从矿石中提取铷铯的研究综述[J]. 盐湖研究, 2024, 32(5): 89-96.
 - [21] 王云生, 郭娟, 刘喜方, 等. 中国铷铯资源、提取技术与开发利用研究[J]. 地球学报, 2024, 45(5): 823-829.
 - [22] 李峥岩, 侯殿保, 常宏, 等. 中国铷铯资源类型、分布、矿床成因、富集规律及分离提取技术研究进展[J]. 中国矿业, 2025, 34(2): 265-283.
 - [23] 闫明, 钟辉, 张艳. 卤水中分离提取铷、铯的研究进展[J]. 盐湖研究, 2006, 14(3): 67-72.
 - [24] Yan, Q.X., Li, X.H., Wang, Z., Wu, X., Guo, H., Hu, Q., *et al.* (2012) Extraction of Valuable Metals from Lepidolite. *Hydrometallurgy*, **117**, 116-118. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.02.004>
 - [25] 刘磊, 马保中, 王成彦, 等. 铷的应用及提取工艺研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(5): 8-15.
 - [26] Chen, Y., Wen, J.K., Song, Y.S., Li, W., Liu, S. and Liu, Y. (2022) Mineralogical Characteristics of Pegmatite Tailings and Beneficiation Assessment of Pollucite in Recovering Cesium. *Minerals*, **12**, Article No. 541. <https://doi.org/10.3390/min12050541>
 - [27] London, D. (2024) The Tanco Pegmatite at Bernic Lake Manitoba, Canada. *Rocks & Minerals*, **99**, 60-77. <https://doi.org/10.1080/00357529.2023.2253106>
 - [28] 张霜华. 浅谈拓宽我国铷铯的应用领域[J]. 新疆有色金属, 1998(2): 43-47.
 - [29] 孙映祥, 林博磊. 国内外铷资源开发利用研究及政策建议[J]. 中国矿业, 2019, 28(11): 41-43.
 - [30] Jandová, J., Dvořák, P., Formánek, J. and Vu, H.N. (2012) Recovery of Rubidium and Potassium Alums from Lithium-Bearing Minerals. *Hydrometallurgy*, **119**, 73-76. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.02.010>
 - [31] Zeng, Q., Huang, L.M., Ouyang, D.X., Hu, Y., Zhong, H. and He, Z. (2019) Process Optimization on the Extraction of Rubidium from Rubidium-Bearing Biotite. *Minerals Engineering*, **137**, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.020>
 - [32] Shan, Z.Q., Shu, X.Q., Feng, J.F. and Zhou, W. (2013) Modified Calcination Conditions of Rare Alkali Metal Rb-Containing

- Muscovite ($\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$). *Rare Metals*, **32**, 632-635. <https://doi.org/10.1007/s12598-013-0068-3>
- [33] Xing, P., Wang, C., Ma, B., Wang, L., Zhang, W. and Chen, Y. (2018) Rubidium and Potassium Extraction from Granitic Rubidium Ore: Process Optimization and Mechanism Study. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **6**, 4922-4930. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04445>
- [34] 郭秀红, 郑绵平, 刘喜方, 等. 西藏盐湖卤水铯资源及其开发利用前景[J]. 盐业与化工, 2008, 37(3): 8-13.
- [35] 王斌, 吉远辉, 张建平, 等. 盐湖 Rb、Cs 资源提取分离的研究进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2008, 30(5): 104-110.
- [36] Kesler, S.E., Gruber, P.W., Medina, P.A., Keoleian, G.A., Everson, M.P. and Wallington, T.J. (2012) Global Lithium Resources: Relative Importance of Pegmatite, Brine and Other Deposits. *Ore Geology Reviews*, **48**, 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006>
- [37] Epstein, J.A. (1976) Utilization of the Dead Sea Minerals (a Review). *Hydrometallurgy*, **2**, 1-10. [https://doi.org/10.1016/0304-386x\(76\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0304-386x(76)90009-8)
- [38] 卢智. 平落坝构造海相深层卤水中铷分离提取技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [39] 高丹丹. 油气田卤水中铷、铯的分离提取[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [40] 郑绵平, 王秋霞, 多吉. 水热成矿新类型——西藏铯硅华矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [41] 孙海霞, 保英莲, 曹红翠, 等. 青海盐湖卤水铷铯资源及分析方法研究进展[J]. 广东化工, 2012, 39(4): 11-12.
- [42] 邓飞跃, 尹桃秀, 甘文文, 等. 锂云母提锂母液中钾铷铯的综合利用[J]. 矿业工程, 1999, 19(1): 50-52.
- [43] 曹欢, 赵笑益, 吴天骄, 等. 锂云母提锂副产物分段除杂-萃取回收铷铯[J]. 矿冶, 2025, 34(3): 464-470.
- [44] Zhou, L.B., Yuan, T.C., Li, R.D., Zhong, Y. and Lei, X. (2015) Extraction of Rubidium from Kaolin Clay Waste: Process Study. *Hydrometallurgy*, **158**, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.10.010>
- [45] Zheng, S., Li, P., Tian, L., Cao, Z., Zhang, T., Chen, Y., et al. (2016) A Chlorination Roasting Process to Extract Rubidium from Distinctive Kaolin Ore with Alternative Chlorinating Reagent. *International Journal of Mineral Processing*, **157**, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.09.006>
- [46] Wang, J.L. and Zhuang, S.T. (2019) Removal of Cesium Ions from Aqueous Solutions Using Various Separation Technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **18**, 231-269. <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09499-9>
- [47] 宝阿敏, 钱志强, 郑红, 等. 铷、铯的分离提取方法及其研究进展[J]. 应用化工, 2017, 46(7): 1377-1382.
- [48] 葛飞, 李雷明, 姜莹莹, 等. 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, 2023, 52(2): 639-645.
- [49] Fang, D.Z., Wang, Y.P., Liu, H.N., Zhang, H., Ye, X., Li, Q., et al. (2021) Efficient Extraction of Rb^+ and Cs^+ by a Precipitation Flotation Process with Ammonium Phosphowolframate as Precipitant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **608**, Article ID: 125581. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125581>
- [50] Li, K., Yin, Z.C., Dong, J., Xu, L., Liu, Y., Ma, R., et al. (2023) Separation of Cs^+ from Rb^+ and Cs^+ Co-Existing Solution by $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ Precipitation to Produce CsI . *Chemical Engineering Research and Design*, **197**, 372-379. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.07.023>
- [51] 杨志红, 杨磊, 丁有钱, 等. 沉淀法分离 Cs 和 Rb 的研究[J]. 核化学与放射化学, 2004, 26(2): 95-98.
- [52] Rajec, P. and Domianová, K. (2008) Cesium Exchange Reaction on Natural and Modified Clinoptilolite Zeolites. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **275**, 503-508. <https://doi.org/10.1007/s10967-007-7105-3>
- [53] 王颖, 张雨山, 黄西平. 重稀碱金属铯分离提取技术的研究进展[J]. 化学工业与工程, 2010, 27(5): 457-464.
- [54] Browning, P.E. and Spencer, S.R. (1916) On the Separation of Caesium and Rubidium by the Fractional Crystallization of the Aluminium and Iron Alums and Its Application to the Extraction of These Elements from Their Mineral Sources. *American Journal of Science*, **4**, 279-281. <https://doi.org/10.2475/ajs.s4-42.249.279>
- [55] 王兴磊, 李芳, 孙都成. 酸分级结晶法分离稀土镧铈[J]. 化工技术与开发, 2009, 38(9): 11-14.
- [56] 盛怀禹. 钾、铷、铯萃取化学[J]. 有机化学, 1979(1): 118-147.
- [57] 陈尚清, 石健, 史振, 等. 溶剂萃取法从卤水中提取铷、铯研究进展[J]. 盐科学与化工, 2017, 46(6): 45-49.
- [58] Li, Z., Pranolo, Y., Zhu, Z. and Cheng, C.Y. (2017) Solvent Extraction of Cesium and Rubidium from Brine Solutions Using 4-Tert-butyl-2-(α -methylbenzyl)-phenol. *Hydrometallurgy*, **171**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.03.007>
- [59] 朱军, 郭梅, 徐翌童, 等. 锂云母提锂废液中的铷铯分离及 t-BAMP 萃铷机理[J]. 有色金属工程, 2022, 12(6): 83-90.
- [60] 康敏, 赵笑益, 王望治, 等. 萃取法从高盐废液中分离铷铯并制备氯化铯产品[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(4):

61-66.

- [61] Ross, W.J. and White, J.C. (1964) Determination of Cesium and Rubidium after Extraction with 4-sec-butyl-2-(α -methylbenzyl)phenol. *Analytical Chemistry*, **36**, 1998-2000. <https://doi.org/10.1021/ac60216a035>
- [62] Wang, J.W., Che, D.H. and Qin, W. (2015) Extraction of Rubidium by t-BAMBP in Cyclohexane. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **23**, 1110-1113. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.04.005>
- [63] Xing, P., Wang, G.D., Wang, C.Y., Ma, B. and Chen, Y. (2018) Separation of Rubidium from Potassium in Rubidium Ore Liquor by Solvent Extraction with t-BAMBP. *Minerals Engineering*, **121**, 158-163. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.014>
- [64] Egan, B.Z., Zingaro, R.A. and Benjamin, B.M. (1965) Extraction of Alkali Metals by 4-Sec-butyl-2-(α -methylbenzyl)phenol (BAMBP). *Inorganic Chemistry*, **4**, 1055-1061. <https://doi.org/10.1021/ic50029a030>
- [65] Arnold, W.D., Crouse, D.J. and Brown, K.B. (1965) Solvent Extraction of Cesium (and Rubidium) from Ore Liquors with Substituted Phenols. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, **4**, 249-254. <https://doi.org/10.1021/i260015a002>
- [66] 陈正炎, 赵炜, 王秀香. t-BAMBP 联合萃取铷[J]. 稀有金属, 1992, 16(2): 81-85.
- [67] 胡莉茵, 陈正炎, 程步升. t-BAMBP 萃取分离铷、铯工艺研究[J]. 稀有金属, 1988, 12(3): 196-203.
- [68] 王武尚, 侯瑞琴, 陈莉云. t-BAMBP 萃取色谱法分离铷、铯的研究[J]. 核化学与放射化学, 1999, 21(2): 110-114.
- [69] 李仲清. t-BAMBP 的合成研究[J]. 精细与专用化学品, 2005, 13(12): 20-21.
- [70] 阳卫军, 刘和辉, 罗喜生, 等. t-BAMBP 的催化合成及精馏纯化研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(5): 69-72.
- [71] Rais, J., Krtíl, J. and Chotivka, V. (1971) Extraction and Separation of ^{137}Cs and ^{86}Rb by Means of 4-T-butyl-2-(α -methylbenzyl)phenol. *Talanta*, **18**, 213-218. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(71\)80028-0](https://doi.org/10.1016/0039-9140(71)80028-0)
- [72] 王威, 曹耀华, 高照国, 等. 铷、铯分离提取技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2013(4): 54-58.
- [73] 张石明, 李玉哲, 车玉思, 等. 铷、铯金属的制备技术与应用研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2022, 50(3): 7-14.
- [74] Egan, B.Z. and Arnold, W.D. (1966) The Purity, Properties, and Analytical Determination of 4-Sec-butyl-2-(α -methylbenzyl)phenol. *Analytical Chemistry*, **38**, 950-952. <https://doi.org/10.1021/ac60239a051>
- [75] 肖艳, 王武尚, 李华. 氯铝酸离子液体催化合成 t-BAMBP [J]. 核化学与放射化学, 2010, 32(2): 93-98.
- [76] Roddy, J.W. and Coleman, C.F. (1973) Investigation of Intermolecular Association of 4-Sec-butyl-2-(α -methylbenzyl)phenol (BAMBP) by Use of Dielectric and Isopiestic Measurements. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, **35**, 4271-4278. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(73\)80416-6](https://doi.org/10.1016/0022-1902(73)80416-6)
- [77] Zingaro, R.A. and Coleman, C.F. (1967) Synergism and Diluent Effects in the Extraction of Cesium by 4-Sec-butyl-2-(α -Methylbenzyl)phenol (BAMBP). *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, **29**, 1287-1300. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(67\)80372-5](https://doi.org/10.1016/0022-1902(67)80372-5)
- [78] Rodionova, G.S., Alekseeva, V.V. and Starostin, V.V. (1970) On the Effect of the Structure of Certain Phenols on the Extraction of Rubidium and Cesium. *Zhurnal Neorganicheskoi Khimii*, **15**, 170-178. (In Russian)
- [79] Koyama, M., Tochiyama, O. and Fujinaga, T. (1971) The Extraction of the Cesium Ion with Some Nitrophenols into Nitrobenzene. I. Distribution Studies. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **44**, 1591-1596. <https://doi.org/10.1246/bcsj.44.1591>
- [80] Horner, D.E., Crouse, D.J. and Brown, K.B. (1965) Extraction of Cesium from Aqueous Solution Using Phenols. US 3179503.
- [81] 盛怀禹. 锂、铷、铯萃取化学[J]. 稀有金属, 1983, 2(1): 60-66.
- [82] Tochiyama, O., Koyama, M. and Fujinaga, T. (1971) The Extraction of the Cesium Ion with Some Nitrophenols into Nitrobenzene. II. Homoconjugation Studies by Means of Conductivity Measurements. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **44**, 3028-3032. <https://doi.org/10.1246/bcsj.44.3028>
- [83] 刘瑞明. 取代酚类萃取剂的结构修饰及对铷、铯萃取性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [84] 杨玲, 王林生, 赖华生, 等. 不同稀释剂中 t-BAMBP 萃取铷铯的研究[J]. 稀有金属, 2011, 35(4): 627-632.
- [85] 李瑞琴, 刘成林. t-BAMBP 萃取法提取卤水中铷、铯及影响因素分析[J]. 盐业与化工, 2014, 43(1): 17-19.
- [86] Chen, Z. and Chen, F. (1995) Study on Related Factors of t-BAMBP Extraction of Rubidium and Cesium. *Chinese Journal of Rare Metals*, **19**, 245-247.
- [87] 陈正炎, 陈富珍. t-BAMBP 萃取铷、铯反应机理及热力学函数研究[J]. 稀有金属, 1995, 19(5): 331-333.

- [88] Xing, P., Wang, C.Y., Chen, Y. and Ma, B. (2021) Rubidium Extraction from Mineral and Brine Resources: A Review. *Hydrometallurgy*, **203**, Article ID: 105644. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105644>
- [89] 王国栋, 邢鹏, 王成彦. t-BAMBP 萃取铷机理研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(4): 39-41.
- [90] Pang, D.K., Zhang, Z.H., Zhou, Y.Q., Fu, Z., Li, Q., Zhang, Y., et al. (2022) The Process and Mechanism for Cesium and Rubidium Extraction with Saponified 4-Tert-butyl-2-(α -methylbenzyl) Phenol. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **46**, 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.07.001>
- [91] Fox, J.J. and Martin, A.E. (1937) Investigations of Infra-Red Spectra-Absorption of Some Hydroxy Compounds in the Region of 3μ . *Proceedings of the Royal Society of London. Series A—Mathematical and Physical Sciences*, **162**, 419-441. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0192>
- [92] Coggeshall, N.D. (1947) Infrared Spectroscopic Investigations of Hydrogen Bonding in Hindered and Unhindered Phenols. *Journal of the American Chemical Society*, **69**, 1620-1624. <https://doi.org/10.1021/ja01199a014>
- [93] 徐光宪, 袁承业. 稀土的溶剂萃取[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [94] 赵琳. t-BAMBP 萃取铷的热力学、动力学及连续萃取放大试验[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [95] 刘雪颖, 杨锦瑜, 陈晓伟, 等. t-BAMBP 分离铷钾萃取机理及热力学函数研究[J]. 核化学与放射化学, 2007, 29(3): 151-155.
- [96] Lv, Y.W., Ma, B.Z., Liu, Y.B., Wang, C., Zhang, W. and Chen, Y. (2022) Selective Extraction of Cesium from High Concentration Rubidium Chloride Leach Liquor of Lepidolite. *Desalination*, **530**, Article ID: 115673. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115673>
- [97] 冯振华, 安莲英, 汪本高. 4-甲基-2-(α -甲基苄基)酚铷钾萃取反应机理及热力学研究[J]. 化学工程, 2018, 46(2): 10-13, 57.
- [98] You, Z.G., Wang, S.Y., Li, J.S., et al. (2016) Extraction of Trace Rubidium and Its Thermodynamic Functions by t-BAMBP in Alkaline System. *Journal of Salt Lake Research*, **24**, 38-42.
- [99] 孙瑞毅, 谢宇, 徐国栋, 等. 新型有机膦酸类萃取剂 P355 和 P227-355 萃取分离重稀土性能研究[J]. 中国稀土学报, 2025, 43(1): 1-10.
- [100] Huang, D., Zheng, H., Li, B. and Ma, G. (2018) Extraction Kinetics of Rubidium in Brine Solutions by 4-Tert-butyl-2-(α -methylbenzyl)phenol/Sulfonated Kerosene Using a Single Drop Method. *Chemical Physics Letters*, **713**, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2018.10.021>
- [101] Anesi, P.R. and Chiarizia, R. (1980) CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry. CRC Press.
- [102] 尤志刚, 王舒娅, 李波, 等. t-BAMBP 萃取微量铷的基础研究[J]. 化学试剂, 2015, 37(2): 161-164.
- [103] Chen, W.S., Lee, C.H., Chung, Y.F., Tien, K., Chen, Y. and Chen, Y. (2020) Recovery of Rubidium and Cesium Resources from Brine of Desalination through t-BAMBP Extraction. *Metals*, **10**, Article No. 607. <https://doi.org/10.3390/met10050607>
- [104] Liu, S.M., Liu, H.H., Huang, Y.J. and Yang, W. (2015) Solvent Extraction of Rubidium and Cesium from Salt Lake Brine with t-BAMBP-Kerosene Solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **25**, 329-334. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(15\)63608-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(15)63608-1)
- [105] 吴建江. 萃取法从高盐废液中分离铷铯并制备氯化铯的研究[J]. 新疆有色金属, 2023, 46(6): 63-65.
- [106] Wang, Y.L., Huang, C., Li, F.J., Dong, Y., Zhao, Z. and Sun, X. (2016) The Development of Sustainable Yttrium Separation Process from Rare Earth Enrichments Using Bifunctional Ionic Liquid. *Separation and Purification Technology*, **162**, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.01.042>
- [107] 秦玉楠. 新型 AMOP/SiO₂ 离子交换剂的制备及应用[J]. 中国钼业, 2001, 25(5): 19-20.
- [108] 曹冬梅, 张雨山, 高春娟, 等. 提铷技术研究进展[J]. 盐业与化工, 2011, 40(5): 44-47.
- [109] 马生财, 邵传兵, 鲁兴武. 复杂铷浸出液提纯试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(7): 41-45.
- [110] Xie, J., Li, K., Shi, Z., Min, C., Li, S., Yin, Z., et al. (2023) Separation of Cesium and Rubidium from Solution with High Concentrations of Potassium and Sodium. *Separations*, **10**, Article 42. <https://doi.org/10.3390/separations10010042>
- [111] 闫树旺, 唐明林, 邓天龙, 等. 卤水中铷铯的分离与提取[J]. 矿物岩石, 1993, 13(2): 113-119.
- [112] 张利珍, 张永兴, 张秀峰, 等. 采用氯化焙烧-水浸工艺综合提取锂铷铯[J]. 无机盐工业, 2019, 51(10): 48-50.
- [113] Wang, J.L., Hu, H.Z. and Wu, K.Q. (2020) Extraction of Lithium, Rubidium and Cesium from Lithium Porcelain Stone. *Hydrometallurgy*, **191**, Article ID: 105233. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105233>
- [114] Zhang, X.F., Chen, Z.C., Rohani, S., He, M., Tan, X. and Liu, W. (2022) Simultaneous Extraction of Lithium, Rubidium, Cesium and Potassium from Lepidolite via Roasting with Iron(II) Sulfate Followed by Water Leaching. *Hydrometallurgy*, **208**, Article ID: 105820. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105820>

- [115] 鲁奥林, 张贵清, 曾理, 等. 锂云母提锂副产物铷铯矾中铷铯的回收研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2022, 50(1): 16-22.
- [116] 杨晓凤, 李沐晴, 马昱昭, 等. 从锂云母中分离提取锂、铷、铯方法的研究进展[J]. 中国材料进展, 2025, 44(7): 684-693.
- [117] 毛我强, 郭江凤, 贾文豪, 等. 锂云母冶炼提锂及铷、铯协同回收研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2026(3): 34-45.
- [118] 安莲英, 宋晋, 卢智, 等. t-BAMBP 萃取分离高钾卤水中的铷[J]. 化工矿物与加工, 2010(10): 14-17.
- [119] 程鑫雨, 时东, 张禹泽, 等. t-BAMBP-P204 协同体系萃取盐湖卤水中的铯[J]. 盐湖研究, 2024, 32(5): 66-75.
- [120] Lu, Y.N., Liu, K.Y., Zhang, J.J., Liao, H.W., Chen, J.H. and Wang, Y. (2026) Mechanism of Synergistic Enhancement in Cesium Extraction by Organophosphorus Extractants and 4-Tert-Butyl-2-(α -Methylbenzyl) Phenol under Weak Alkaline Conditions. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*.
- [121] Ai, H., Ma, L., Ma, Y., Xi, X., Nie, Z., Nan, D., *et al.* (2026) Selective Recovery of Cesium and Rubidium from Lepidolite Waste Liquid after Lithium Extraction: A Novel Extraction System of t-BAMBP-TiOA Based on Affinity Regulation. *Hydrometallurgy*, **242**, Article ID: 106684. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2026.106684>
- [122] Liu, R.M., Gao, D.D., Dong, Y.P., *et al.* (2016) Synthesis of 4-Tert-Amyl-2-(α -Methylbenzyl) Phenol. *Industrial Catalysis*, **24**, 72-75. (In Chinese)
- [123] 蒋颖. t-BAMBP 的合成及其副产物的铷铯萃取性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [124] Carré, P., Piofczyk, T. and Bothe, S. (2025) Solvent Solutions: Comparing Extraction Methods for Edible Oils and Proteins in a Changing Regulatory Landscape. Part 7: Overall Comparison between Solvent Solutions. *OCL*, **32**, Article No. 9. <https://doi.org/10.1051/ocl/2025013>
- [125] Wang, S.J., Xiao, J., Yuan, F., Li, L., Guo, Y., Xie, Y., *et al.* (2022) Solid-Liquid Phase Equilibrium and Phase Diagram of the Ternary System ($\text{NaNO}_3 + \text{CsNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) and Its Application for Cesium Nitrate Separation. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, **165**, Article ID: 106650. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2021.106650>
- [126] Zeng, Y., Wang, K., Tong, H., Lv, X., He, Y. and Yu, X. (2022) Stable-Phase Diagram of the Quaternary Water-Salt System $\text{K}^+, \text{Rb}^+, \text{Cs}^+/\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ at $t = 323.2 \text{ K}$. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **67**, 491-499. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.1c00643>
- [127] Chen, X.L. and Hu, W.P. (2024) Direct and Efficient in Situ Rubidium Extraction from Potassium Chloride Salts. *Nature Sustainability*, **7**, 1672-1680. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01449-w>
- [128] Fan, Y.F., Gao, D.D., Li, D.D. and Zeng, D. (2025) Dissolution and Recrystallization of Alum to Separate Cesium, Rubidium and Potassium Using Their Different Precipitation Kinetics to Reach Higher Purity than Solubility Equilibria Based Purity of $\text{MAl}(\text{SO}_4)_2$ ($\text{M} = \text{Cs}, \text{Rb}, \text{K}$). *Hydrometallurgy*, **233**, Article ID: 106454. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2025.106454>