

取代苄基苯酚“单/双取代混合”协萃的可能性与机理思考

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

¹兰州交通大学, 国家绿色镀膜技术与装备工程技术研究中心, 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9月9日; 录用日期: 2026年9月29日; 发布日期: 2026年10月12日

摘要

铷、铯因离子半径与化学性质极为相近, 高效分离是分离化学的难点。取代苄基苯酚类尤以4-叔丁基-2-(α -甲基苄基)苯酚(t-BAMP)及其相关衍生物借助“酚盐 - Cs⁺超分子聚集体”识别机制成为铷铯溶剂萃取的研究主线, 近年协萃研究集中于t-BAMP与异类萃取剂(如: 胺、有机磷)的组合。本文提出一种尚未被系统研究的设想: 将t-BAMP (简称A)与其双取代衍生物4-(叔丁基)-2,6-双(1-苯基乙基)苯酚(简称B)混合, 同种分子家族内可否因“结构互补自组装”而产生一定的协同? 文章从阳离子交换 - 超分子自组装视角给出机理思考, 并以已开展的C1~C9溶解度/相行为筛查与不同钾离子浓度对Rb 4 ppm/Cs 3 ppm料液的干扰初探作为旁证。需要说明: 本文为观点性文章, 所涉协萃性能均为基于文献与物性数据的假说, 尚待实验验证。

关键词

取代苄基苯酚, 4-叔丁基-2-(α -甲基苄基)苯酚, 铷, 铯, 协同萃取, 超分子自组装, 单/双取代混合物

Synergistic Extraction of Mono-/Di-Substituted Mixture Benzylphenols: Possibilities and Mechanistic Insights

Tiantian Zhang^{1,2}, Rongwen Lin², Donghai Yu², Shaoji Xiang², Wen Zheng³, Guoqiang Zong², Chenglong Wang^{1*}

¹National Engineering Research Center for Green Coating Technology and Equipment, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

*通讯作者。

文章引用: 张甜甜, 林荣文, 余东海, 向绍基, 郑文, 宗国强, 王成龙. 取代苄基苯酚“单/双取代混合”协萃的可能性与机理思考[J]. 材料科学, 2026, 16(10): 99-106. DOI: 10.12677/ms.2026.1610194

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: September 9, 2026; accepted: September 29, 2026; published: October 12, 2026

Abstract

Rubidium and cesium, by virtue of their nearly identical ionic radii and closely overlapping chemical behavior, pose a long-standing challenge for efficient separation in separation chemistry. Among substituted benzylphenols, 4-tert-butyl-2-(α -methylbenzyl)phenol (t-BAMBP) and its related derivatives have become the central paradigm for Rb/Cs solvent extraction, operating through a phenolate- Cs^+ supramolecular-aggregate recognition motif. Synergistic extraction in this system has, to date, been explored almost exclusively by pairing t-BAMBP with structurally dissimilar extractants (e.g., amines, organophosphorus acids). Here we advance a hitherto-unexamined hypothesis: that co-mixing t-BAMBP (A) with its bis-substituted derivative, 4-(tert-butyl)-2,6-bis(1-phenylethyl)phenol (B), may elicit a measurable synergistic effect within the same molecular family via structure-complementary self-assembly. We rationalize this possibility from the coupled perspectives of cation exchange and supramolecular self-assembly, and marshal as circumstantial support the solubility/phase-behavior screening of compounds C1~C9 together with a preliminary investigation into the interference of varying K^+ concentrations on feed solutions containing 4 ppm Rb and 3 ppm Cs. This is a perspective article; the synergistic performances discussed are hypotheses grounded in the literature and physicochemical data, and await experimental validation.

Keywords

Substituted Benzylphenols, 4-Tert-Butyl-2-(α -methylbenzyl)phenol (t-BAMBP), Rubidium, Cesium, Synergistic Extraction, Supramolecular Self-Assembly, Mono-/Di-Substituted Mixture

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

铷(Rb)与铯(Cs)是高科技领域(涵盖航空、光伏及医药等行业)中应用广泛的稀有碱金属[1]。Rb、Cs 及其化合物在航空航天[2]、高科技制造、医疗[3][4]、传感器、通信、生物学[5]、能源及量子技术领域具有不可替代的作用[6][7]。铷、铯在光电材料[8]、原子钟[9]等领域具有不可或缺的应用价值,但是铷、铯同属碱金属元素,其离子 Rb^+ (1.52 Å)与 Cs^+ (1.67 Å)半径相近,且水相化学行为高度相似,致使二者分离极为困难[10][11]。由于铷、铯与同族元素钾、钠的物理和化学性质极为相似,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分步结晶法、吸附法[12]、沉淀法、离子交换法、和溶剂萃取法[13]-[15]。其中,溶剂萃取法凭借处理量大、易连续化,被认为是最具工业化前景的分离路径之一[16]。

取代苄基苯酚类源于 1960 年代 ORNL [17]-[19]筛选出的 4-氯-2-苄基苯酚(Santophen-1)与 4-仲丁基-2-(α -甲基苄基)苯酚(BAMBP),即因可通过酚羟基阳离子交换实现 Cs^+ 的高效识别[20],其中,4-叔丁基-2-(α -甲基苄基)苯酚(t-BAMBP)因合成收率高、成本可控而成为工业应用最广的衍生物[21]。从早期简单酚

类到取代苯酚的不断优化, 4-叔丁基-2-(α -甲基苄基)苯酚(t-BAMBP)最终因综合性能最优而成为现代铷铯萃取分离的主线体系[22][23]。Bryan 等[24]的单晶结构证实, Cs^+ 并非与单个酚氧直接配位, 而是被若干取代苄基酚盐的氧供体与芳香环 π -阳离子作用共同构筑的超分子聚集体所包结; Delmau [24]等进一步给出了取代基位置与类型对 Cs 选择性的构效规律, Cs/Na 分离因子可达 25~3800。尽管如此, 单一 t-BAMBP 体系仍受限于碱耗大、强碱条件下萃取剂以酚盐形式溶解流失, 以及第三相/乳化等工程痛点[25], 难以持续提效。

协同萃取是突破单一体系瓶颈的有效途径。近年来文献报道了多类 t-BAMBP 与异种萃取剂的协萃体系: 已报道与胺类 TiOA 协萃三级逆流 $\beta_{(\text{Cs}/\text{Rb})}$ 达 668、 CsCl 纯度 99.9% [26]、与有机磷类 D2EHPA 协同萃取可实现碱的用量减少, 盐湖卤水中 Cs^+ 萃取率达 92.6% [27]、与 Cyanex272 协同萃取在弱碱条件下使碱耗降低 90%以上[28][29]等异源体系, 上述工作等一致表明, “t-BAMBP+异类萃取剂”可产生显著正协萃效果, 其协同萃取本质来自酚羟基与磷/胺官能团的酸碱或配位互补。

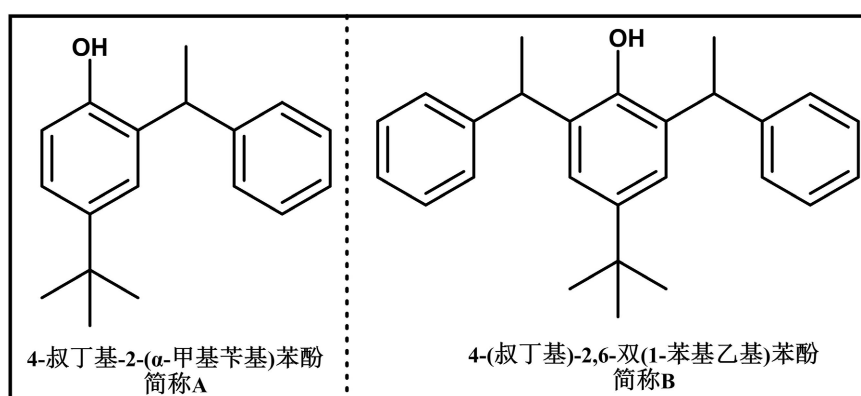


Figure 1. Molecular structures of two types of phenolic extractants

图 1. 两种酚类萃取剂的分子结构式

然而, 一个尚未被系统研究的问题是: 同种 t-BAMBP 的“单取代体”与“双取代体”按不同比例混合, 是否会因取代基互补、酚羟基密度与空间位阻的协同而诱发协同萃取? 这既是一个有趣的自组装识别机理问题, 也具备潜在的工业应用价值。本文据此提出“单/双取代混合协同萃取”设想: 将 t-BAMBP (简称 A) 与其双取代衍生物 4-(叔丁基)-2,6-双(1-苯基乙基)苯酚(简称 B)混合, 同种分子家族内是否也能因“结构互补自组装”而产生一定的协同萃取作用? 文章从阳离子交换-超分子自组装视角给出机理思考, 并以已开展的 C1~C9 溶解度/相行为筛查与不同钾离子浓度对 Rb 4 ppm/Cs 3 ppm 料液的干扰初探作为旁证。

2. 机理假说: 结构互补驱动混合自组装

物质 A 与物质 B (分子结构式如图 1 所示): ① 位阻——B 的额外取代基改变 Cs^+ 包结腔口部几何; ② 电子效应——软酸的单邻位酚 A 优先充当去质子化的“阴离子核”(易生成、离域稳), 软碱的 2,6-双邻位酚 B 优先充当富电子、强配位且空间屏蔽的“溶剂化配体”; 这种酸-碱与给-受的电子角色互补[30], 使混合萃取簇比单一体系更稳定, 从而可能产生协萃, 提升 Cs^+ 亲和力; ③ 相行为——二取代物质 B 显著提高疏水性, 改变溶解度与第三相倾向[25]。三者使物质 A 和物质 B 混合可能突破单一分子局限: 物质 A 提供主识别腔与良溶性, 物质 B 提供更高亲和力与电子调控位点。

机理包含两个层次。第一层阳离子交换: 酚羟基在碱性条件下去质子化,

$\text{M}^+(\text{aq}) + \text{ArOH}(\text{org}) \rightleftharpoons \text{ArOM}(\text{org}) + \text{H}^+(\text{aq})$, Cs^+ 因较低水合能与较大离子半径, 在交换步骤中最易被

转移入有机相[31][32]，而其对 Cs⁺的高选择性主要源自第二层识别。第二层超分子自组装识别：Cs⁺被多个酚盐经酚羟基-酚氧负离子氢键网络(O-H...O)与 π -阳离子作用“包结”于自组装空腔，而非与单个酚氧直接配位[30]。我们推测，物质 A、物质 B 共去质子化后，因取代基差异其酚羟基氢键供受体能力、酚盐聚集倾向不同，混合组装形成的氢键/ π -堆叠网络不同于纯物质 A 或纯物质 B，构建出“几何更适配 Cs⁺、电子更利于稳定酚盐”的混合聚集体——即物质 B 锚定亲和力、物质 A 提供识别腔与相溶性，二者分工使 Cs⁺络合自由能低于纯组分，表现为协同萃取。产生协同效应的萃取反应机制相对比较复杂，影响产生协同效应的因素较多[33]。目前，萃取剂和螯合萃取剂(AB 类)组成的协萃体系的萃取机制研究比较多，该协萃体系可能的协同机制如下：被萃金属离子与一种萃取剂配位形成了萃合物，但金属离子的配位数尚未达到饱和，当加入另一种萃取剂后，使配位键达到饱和，形成结构稳定的加合物(协同萃合物)，增加了萃合物的亲油性，从而提高了分配比[34]。

这一协同萃取源于“结构互补自组装”，区别于异源协萃的酸碱/配位互补，是本文相对已有工作的差异化贡献。需强调：上述机理为“推测”，可检验判据包括：

- (a) 协萃系数 $R = \frac{D_{\text{协同}}}{D_A + D_B}$ ，当 R 显著 > 1 时，表明有正协萃效果；
- (b) 傅里叶变换红外光谱仪测酚 O-H 区出现非线性叠加位移；
- (c) ¹H NMR 苄基/酚环质子出现化学位移发生明显变化。

3. 已有物性数据的旁证

前期筛查 C1~C9 (各化合物结构式见图 2)在六种稀释剂中的溶解度与相行为(表 1)，强烈支持“取代基决定相行为、且混合可调控”：C6 全溶；C1 磺化煤油溶解度 < 5%、二甲苯好溶但乳化最高 90%；C3、C7 降温即冷析(低温出现第三相风险)；C9 加热亦不溶(属于 B 类极端)。由此可以推测出：纯物质 B 难溶却亲和力强、纯物质 A 良溶但选择性有限，少量 B 混入 A 既可抬升选择性、又借物质 A 可抑第三相——混合在性能与工程相行为间提供调节作用，呼应 Santophen-1 因溶解度缺陷被取代的历史[22]与 Tan 等对 t-BAMBP 溶解度的定量研究[25]。需说明：此为定性旁证，非协萃性能证据(表 1)。

Table 1. Solubility screening of C1~C9
表 1. C1~C9 溶解度筛查

编号	正辛醇	环己烷	正庚烷	甲苯	二甲苯	磺化煤油
C1	+	-	---	++	++	---
C2	---	++	+	++	+-	++
C3	++	+	---	++	++	---
C4	+-	+	+	+	+	++
C5	+-	+	+	+	+	++
C6	++	++	++	++	++	++
C7	-	+-	+-	++	++	---
C8	+-	+-	+-	+-	+-	++
C9	---	---	---	---	---	---

注：0.1 g 的 C1~C9 分别溶于不同溶剂(200 μ L)中：+：好溶，上下摇一下瓶子可全溶；++：很好溶，加入即溶；+-：未全溶，超声可全溶；-：70%不溶；--：90%不溶(加热可溶解部分，但冷却会析出)；-：未全溶；---：加热也不溶解。数据源自作者实验记录。

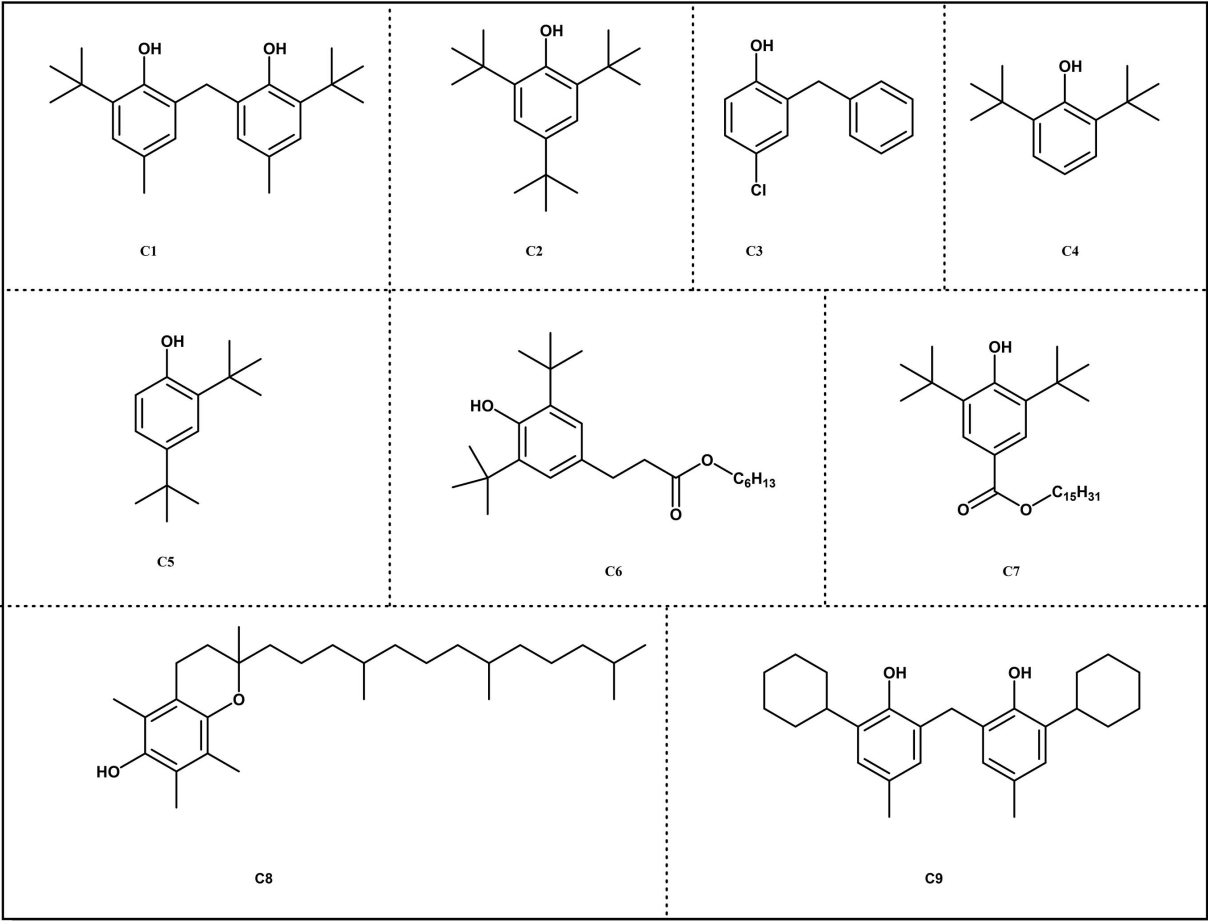


Figure 2. Structures of phenolic compounds C1~C9
图 2. 酚类化合物 C1~C9 的结构式

据 Li 和 Liu (2014)报道[35], 在 t-BAMBP 从卤水体系萃取铷、铯的过程中, Na^+ 因与萃取剂作用弱而基本不产生影响, 但 K^+ 与 Rb^+ 物化性质相近、存在竞争, 对铷的萃取产生明显不利影响——其萃取率随溶液中钾含量的增加而显著降低。可见 K^+ 浓度对铷铯的萃取有很大的影响。但是尚未有研究表明在测试阶段 K^+ 浓度对铷铯浓度的影响。因此, 我们在用原子吸收仪测试铷铯浓度时选用不同浓度的 K^+ 测试同一浓度的 Cs 和 Rb (表 2)。以 Rb^+ 4 ppm/ Cs^+ 3 ppm 料液、 K^+ 1~3 g/L (2% HNO_3)测试, Cs^+ 测出 3.209/3.264/3.264 ppm、 Rb^+ 测出 4.038/4.099/3.962 ppm, 约等于原始浓度, 表明在测试阶段 K^+ 浓度对 Rb 和 Cs 的影响不太大。若混合协萃能抬升 Rb/Cs 萃取率并保持低 K 共萃, 便契合卤水需求, 其对应应为卤水协萃工作而非“高 K 同时高 Cs/Rb”的工业料液工作[36] (表 2)。

Table 2. Preliminary assessment of potassium interference in feed solutions with 4.0 ppm Rb and 3.0 ppm Cs
表 2. 不同钾离子浓度对 Rb 4.0 ppm/Cs 3.0 ppm 料液的干扰初探

K^+ 浓度	1 g/L K (2% HNO_3)	2 g/L K (2% HNO_3)	3 g/L K (2% HNO_3)
3 ppm Cs	3.209	3.264	3.264
4 ppm Rb	4.038	4.099	3.962

注: (数值为测出浓度, 单位 ppm;)数据源自实验记录。

Table 3. Extraction performance data of phenolic compounds C1~C8, aqueous phase pH $\approx$ 13
表 3. 酚类化合物 C1~C8 的萃取性能数据, 水相 pH $\approx$ 13

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
D _{Cs}	0.002	0.09	0.450	0.247	0.22	0.225	0.005	0.013
D _{Rb}	0.13	0.05	0.02	0.04	0.12	0.019	0.06	0.023
E _{Cs}	2%	8%	31%	19.7%	18%	18%	5%	1.3%
E _{Rb}	11%	4%	1.8%	3.6%	10.8%	1.85%	6%	10.8%
$\beta_{Cs/Rb}$	0.2	1.8	23.8	6.8	1.8	11.9	0.8	0.6

注: D_{Cs}、D_{Rb} 分别为 Cs⁺、Rb⁺ 的分配比; E_{Cs}、E_{Rb} 分别为 Cs⁺、Rb⁺ 的萃取率; $\beta_{Cs/Rb}$ 为 Cs⁺ 对 Rb⁺ 的分离系数。根据表 1, 物质 C2、C4、C5、C6、C8 的稀释剂选择碘化煤油; 物质 C1、C3、C7 的稀释剂选择甲苯。

由表 3 中 C1~C8 萃取数据, 含邻位苄基的单取代酚 C3 综合最优($\beta_{Cs/Rb} = 23.8$), 证实 2-苄基团 π -芳环作用构成 Cs⁺ 识别核心; 反观双酚 C1、长链酯基 C6/C7 及 C8 均明显劣化, 表明单纯增加取代基或引入非苄基官能团并非优化路径。据此, 本视角提出将单取代 t-BAMBP(A) 与双取代衍生物 B 共混: A 提供高效酚盐识别位点, B 以双苄基强化超分子组装, 二者借“结构互补自组装”诱发同类分子协同作用。

4. 待验证路径

为将假说推向实证: ① 分别测单用物质 A、单用物质 B 的 E_{Cs}、E_{Rb} 与 $\beta_{(Cs/Rb)}$; ② 设物质 A:物质 B = 1:1、1:3、3:1 测协萃系数 R; ③ 总浓度 25%/50%/75%考察 R、 β 随浓度变化; ④ FTIR/¹H NMR 与单晶或 SAXS 探聚集体; ⑤ 记录分相时间、第三相/乳化、逆流与循环保持率。若 R 显著 > 1 且谱学出现非线性位移, 则“结构互补自组装”获初步支持; 若 R $\approx$ 1, 则同种混合在该体系不协萃, 结论须修正。

5. 结论

基于超分子自组装识别机理与 C1~C9 物性筛查及酚类化合物 C1~C8 的萃取性能数据, 本文提出“单/双取代混合协萃”设想: A、B 可能经结构互补自组装形成优于单组分的 Cs⁺ 包结环境, 协同源于“结构互补”而非异源协萃的酸碱/配位互补; 已有溶解度 - 第三相构效与不同钾离子浓度对 Rb 4.0 ppm/Cs 3.0 ppm 料液的干扰初探从物性与场景两方面支持“混合改性是一条值得探索的调控路径”。重申: 本文为观点性文章, 所有协萃性能均为假说, 尚待实验验证; 无论证真或证伪, 对该问题的系统研究都将深化对取代苄基苯酚识别机制的理解, 并为卤水等难处理体系铷铯分离提供新思路。

参考文献

[1] Yuan, J., Su, J., Shi, Z., Jiang, H., Wang, H. and Zhang, Y. (2026) A Review on Extraction Technologies of Rubidium and Cesium from Mineral and Brine Resources. *Minerals Engineering*, **243**, Article 110246. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2026.110246>

[2] 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 6158. <https://doi.org/10.3390/ma17246158>

[3] Alsaab, A.H. and Zeghib, S. (2023) Study of Prepared Lead-Free Polymer Nanocomposites for X- and Gamma-Ray Shielding in Healthcare Applications. *Polymers*, **15**, Article 2142.

[4] Sartori, H.E. (1984) Nutrients and Cancer: An Introduction to Cesium Therapy. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, **21**, 7-10. [https://doi.org/10.1016/0091-3057\(84\)90153-9](https://doi.org/10.1016/0091-3057(84)90153-9)

[5] Zhong, J., Yao, W. and Lee, W. (2007) Cesium Chloride Protects Cerebellar Granule Neurons from Apoptosis Induced by Low Potassium. *International Journal of Developmental Neuroscience*, **25**, 359-365. <https://doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2007.07.003>

- [6] Helmke, P.A. and Sparks, D.L. (1996) Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium, and Cesium. Methods of Soil Analysis. In: Sparks, D.L., Ed., *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical Methods*, Soil Science Society of America, 551-574.
- [7] 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 3378. <https://doi.org/10.3390/ma18143378>
- [8] Xing, P., Wang, C., Chen, Y. and Ma, B. (2021) Rubidium Extraction from Mineral and Brine Resources: A Review. *Hydrometallurgy*, **203**, Article 105644. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105644>
- [9] Shi, 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>
- [10] Gao, L., Ma, G., 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>
- [11] 盛怀禹. 钾、铷、铯萃取化学[J]. 有机化学, 1979(1): 118-147.
- [12] Wang, Y., Li, K., Fang, D., Ye, X., Liu, H., Tan, X., *et al.* (2022) Ammonium Molybdophosphate/Metal-Organic Framework Composite as an Effective Adsorbent for Capture of Rb^+ and Cs^+ from Aqueous Solution. *Journal of Solid State Chemistry*, **306**, Article 122767. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122767>
- [13] Wang, J. and Zhuang, S. (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>
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Xu, C., Wang, J. and Chen, J. (2012) Solvent Extraction of Strontium and Cesium: A Review of Recent Progress. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, **30**, 623-650. <https://doi.org/10.1080/07366299.2012.700579>
- [17] Moyer, B.A., Sachleben, R.A., Bonnesen, P.V., *et al.* (2001) Calixarene Crown Ether Solvent Composition and Use Thereof for Extraction of Cesium from Alkaline Waste Solutions. U.S. Patent No. 6,174,503 B1.
- [18] Dean, K.C., Nichols, I.L. and Clemmons, B.H. (1966) III. Cesium Extractive Metallurgy Ore to Metal. *JOM*, **18**, 1198-1202. <https://doi.org/10.1007/bf03378510>
- [19] 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)
- [20] Delmau, L.H., Bryan, J.C., Hay, B.P., Engle, N.L., Sachleben, R.A. and Moyer, B.A. (2000) Benzyl Phenol Derivatives: Extraction Properties of Calixarene Fragments. In: *ACS Symposium Series*, American Chemical Society, 86-106. <https://doi.org/10.1021/bk-2000-0757.ch007>
- [21] Zhang, Q., Xu, J., Li, C., Dong, J., Wang, Y., Shi, C., *et al.* (2025) Research Progress on Rubidium and Cesium Separation and Extraction. *Reviews on Advanced Materials Science*, **64**, Article 20250139. <https://doi.org/10.1515/rams-2025-0139>
- [22] Arnold, W.D., Crouse, D.J. and Brown, K.B. (2002) 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>
- [23] 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.
- [24] Bryan, J.C., Delmau, L.H., Hay, B.P., Nicholas, J.B., Rogers, L.M., Rogers, R.D., *et al.* (1999) Cesium Recognition by Supramolecular Assemblies of 2-Benzylphenol and 2-Benzylphenolate. *Structural Chemistry*, **10**, 187-203. <https://doi.org/10.1023/a:1021884429538>
- [25] Tan, B., Li, Y., Jiang, Z., Wang, Y., Zhou, R. and Liao, H. (2026) Solubility Characteristics and Recovery Study of 4-Tert-Butyl-2-(α -Methylbenzyl) Phenol (t-Bampb) in Cesium and Rubidium Extraction Systems. *Desalination*, **618**, Article 119517. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119517>
- [26] 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 106684. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2026.106684>
- [27] Cheng, X., Shi, D., Zhang, Y., Peng, X., Xie, S., Li, L., *et al.* (2024) Cesium Extraction from an Alkali-Free Solution Using a 4-Tert-Butyl-2-(α -Methylbenzyl) Phenol-di-(2-Ethylhexyl) Phosphoric Acid Synergistic System: A Conceptual Process Flowsheet for Separating Cesium Salt from Salt-Lake Brine. *Hydrometallurgy*, **228**, Article 106353. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106353>
- [28] Liu, K., Lu, Y., Tan, B., Wang, Y. and Qi, T. (2025) Cesium Solvent Extraction from Weak Alkaline Solutions by T-BAMBP and Cyanex272 Synergistic System. *Desalination*, **615**, Article 119266.

- <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119266>
- [29] Liu, K., Lu, Y., Wang, Y., Qi, T. and Chen, J. (2026) Selective Extraction of Cesium by a Novel T-BAMBP-Cyanex272 Synergistic System: Mechanistic Insights from Thermodynamic and DFT Studies. *Desalination*, **637**, Article 120453. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2026.120453>
- [30] Pink, M. and Sieler, J. (2007) Diverse Coordination Modes in Solvated Alkali Metal Phenolates: The Crystal Structures of Rubidium Phenolate · 3 Phenol and Cesium Phenolate · 2 Phenol. *Inorganica Chimica Acta*, **360**, 1221-1225. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2006.06.025>
- [31] 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)
- [32] 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>
- [33] 孙启, 杨丽梅, 黄松涛, 等. 协同萃取机制的研究现状及展望[J]. 稀有金属, 2016, 40(11): 1177-1187.
- [34] 马荣骏. 萃取冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [35] Li, B., Liu, H., Ye, X., Li, S. and Wu, Z. (2014) Rubidium and Cesium Ion Adsorption by a Potassium Titanium Silicate-Calcium Alginate Composite Adsorbent. *Separation Science and Technology*, **49**, 1076-1085. <https://doi.org/10.1080/01496395.2013.869230>
- [36] 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>