

稀有金属矿产资源分布特征及成矿机制：以锂、铍为例

邓晓宁

内蒙古第八地质矿产勘查开发有限责任公司 内蒙古 乌海 016000

摘要：稀有金属矿产资源作为现代工业发展的关键支撑，在新能源、航空航天、电子通信等领域具有不可替代的战略价值。本文以锂、铍两种典型稀有金属为研究对象，系统梳理其全球及中国范围内的资源分布特征，揭示其成矿机制与地质演化规律。研究表明，锂矿以盐湖卤水型和伟晶岩型为主导，成矿时代集中于新生代与中生代；铍矿则以花岗伟晶岩型为主，成矿高峰期中生代燕山期。通过对比分析不同矿床类型的时空分布规律，结合典型矿床案例，本文提出稀有金属矿产资源勘查开发的新方向，为保障国家资源安全提供理论依据。

关键词：稀有金属；锂矿；铍矿；分布特征；成矿机制；资源勘查

1 引言

稀有金属矿产资源，因其在地球地壳中丰度极低、分布极为分散，且提取过程困难重重，长期以来被视为现代工业不可或缺的“维生素”。随着全球能源结构向清洁、低碳方向转型，以及高端制造业对材料性能要求的不断提升，锂、铍等稀有金属的战略地位愈发凸显。锂，作为新能源汽车的核心原料，其供应的稳定性直接关系到新能源汽车与储能产业的可持续发展；铍，则因其独特的物理化学性质，成为航空航天结构件与核反应堆中子减速剂的关键材料。中国，作为全球最大的稀有金属消费国，虽然在资源储量上具有一定的优势，但普遍存在品位低、共伴生矿多、开发技术瓶颈等问题。因此，系统研究锂、铍的分布特征与成矿机制，对于优化资源勘查布局、提升开发利用效率具有重大的现实意义。

2 稀有金属矿产资源概述

2.1 稀有金属的定义与分类

稀有金属，通常指的是在地壳中丰度低于 1×10^{-6} 、难以富集成矿或工业提取过程中面临诸多困难的金属元素。这类元素主要包括锂、铍、铷、钽、锆、钨等。根据它们的地球化学性质与工业用途，可以进一步细分为轻稀有金属、高熔点稀有金属和分散稀有金属三大类。轻稀有金属如锂、铷、铯等，在新能源、陶瓷玻璃等领域有着广泛的应用；高熔点稀有金属如铍、铷、钽等，则是航空航天、核工业等高端制造领域不可或缺的材料；而分散稀有金属如钨、钼、钽等，则多以类质同象的形式赋存于其他矿物中，需要通过综合回收利用的方式提取。

2.2 稀有金属的战略价值

稀有金属作为支撑国家科技自立自强的关键材料，其战略价值不言而喻。以锂为例，全球90%的锂电池正极

材料都依赖于锂资源，这使得锂资源直接决定了新能源汽车与储能产业的竞争力。而铍，则因其比强度（强度/密度比）远高于钛和钢，成为运载火箭、卫星等航天器不可替代的结构材料。此外，铷、钽等稀有金属作为超导合金与电子器件的核心成分，对于推动量子计算与5G通信技术的发展也起着至关重要的作用。

3 锂矿资源分布特征与成矿机制

3.1 全球锂矿资源分布

3.1.1 资源储量与区域集中性

南美“锂三角”（智利、阿根廷、玻利维亚）是全球盐湖锂资源最集中的区域，其储量占全球总量的半数以上。智利以930万吨金属锂储量（折LCE约4900万吨）位居首位，其核心资源阿塔卡玛盐湖由SQM和雅保主导开发，凭借全球最高的锂浓度和最低的开采成本，成为盐湖提锂的标杆。该盐湖锂资源占智利总储量的99%，且镁锂比仅约6:1，适合大规模蒸发法提锂，进一步巩固了其成本优势。阿根廷紧随其后，储量达400万吨金属锂（折LCE约2100万吨），其盐湖资源分布广泛但单个规模较小，例如翁布雷穆埃尔托盐湖由Livent公司运营，锂资源量192万吨LCE，而卡乌查里-奥拉罗斯盐湖则由赣锋锂业控股，资源量达2458万吨LCE^[1]。尽管阿根廷盐湖镁锂比普遍高于智利，开发技术要求更高，但其资源潜力仍吸引全球资本布局。玻利维亚虽拥有全球最大的锂储量（2100万金属吨，折LCE约1.1亿吨），但受限于高镁锂比（乌尤尼盐湖达20:1）、技术瓶颈及基础设施落后，目前仅处于小规模试生产阶段，开发进程显著滞后于邻国。

3.1.2 典型矿床案例分析

乌尤尼盐湖，作为全球最大的锂资源基地，其锂储量占世界的48%。该盐湖的成矿过程与安第斯造山带的新

生代火山活动密切相关，锂通过热液作用富集于封闭盐湖卤水中，最终形成了厚度达10米的锂质沉积层。而格林布什矿床，作为全球最大的硬岩型锂矿，其锂辉石储量高达1.6亿吨，品位为2.4%Li₂O^[2]。该矿床形成于太古宙克拉通边缘，岩浆分异过程中锂在晚期残余熔体中富集，并经过变质作用改造形成了伟晶岩脉。

3.2 中国锂矿资源分布特征

3.2.1 区域分布格局

中国锂资源储量达300万吨金属锂（折LCE约1580万吨），占全球10%，形成硬岩型与盐湖型“双轮驱动”格局。硬岩型锂矿以四川、江西、新疆为核心：四川甲基卡锂辉石矿储量118万吨氧化锂，品位1.28%，但受高海拔、生态脆弱及藏民宗教文化冲突制约，开发进度较慢；江西宜春锂云母矿占全国硬岩储量的40%，原矿品位0.2%-0.6%，需大量原矿处理，但政策推动下产能快速扩张，碳酸锂产量占比从2021年不足20%跃升至2024年33%，成为国内供应的重要增量；新疆大红柳滩锂辉石矿预计2030年产能达100万吨，将进一步增强国内资源自主保障能力。盐湖型锂矿则集中于青海与西藏：青海察尔汗盐湖LiCl储量800万吨，东台吉乃尔盐湖等以硫酸盐型为主，开发条件相对成熟；西藏扎布耶盐湖Li₂CO₃资源量183万吨，镁锂比仅0.03，品质全球领先，但自然环境恶劣、基础设施匮乏，制约了其规模化开发。

3.2.2 成矿时代与构造背景

中国锂矿的成矿时代主要集中于印支-燕山期（250-65Ma）与新生代（65Ma至今）。硬岩型锂矿的形成与碰撞造山带的岩浆活动密切相关，如川西甲基卡矿床就形成于印支期的松潘-甘孜造山带；而盐湖型锂矿则受新生代青藏高原隆升的影响，区域气候变干导致盐湖逐渐浓缩富集锂元素。

3.3 锂矿成矿机制与模式

3.3.1 盐湖卤水型锂矿

盐湖卤水型锂矿的成矿过程可以分为三个阶段。首先是源区富集阶段，火山岩风化释放锂元素，并通过地表径流搬运至封闭盆地；其次是卤水演化阶段，在干旱气候条件下，盐湖经历碳酸盐型→硫酸盐型→氯化物型的演化过程，锂在卤水中逐步富集；最后是沉淀成矿阶段，当卤水锂浓度超过溶解度时，锂以锂霞石、扎布耶石等形式沉淀下来^[3]。

3.3.2 伟晶岩型锂矿

伟晶岩型锂矿的成矿模型以“五层楼+地下室”为代表。岩浆分异是成矿的关键过程，花岗质岩浆在深部经历高度分异形成富锂残余熔体；随后残余熔体沿构造裂

隙多次脉动侵入形成伟晶岩脉群；在晚期热液活动的作用下，锂云母、锂辉石等矿物结晶并伴随钠长石化、云英岩化等蚀变现象。

4 铍矿资源分布特征与成矿机制

4.1 全球铍矿资源分布

4.1.1 资源储量与区域集中性

全球铍资源量超过10万吨，主要分布于美国（60%）、中国（15%）、巴西与哈萨克斯坦等地。其中，火山岩型铍矿占据了全球供应量的80%，以美国犹他州的SporMountain矿床为代表；而伟晶岩型铍矿则占据了全球储量的70%，中国新疆的可可托海和四川九龙的打枪沟矿床是典型代表。

4.1.2 典型矿床案例分析

SporMountain矿床作为全球最大的铍生产基地，其铍品位为0.5%，矿体赋存于高硅流纹岩与花岗斑岩接触带。该矿床的成矿过程与早白垩世古太平洋板块俯冲引发的岩浆活动密切相关，铍以羟硅铍石的形式沉淀下来。而可可托海矿床则是世界级的铍矿床，其氧化铍储量高达300万吨，占全国的70%。该矿床的矿体呈岩钟状产于花岗伟晶岩脉中，并伴生有锂、铌、钽等稀有金属元素，成矿时代为中生代燕山期。

4.2 中国铍矿资源分布特征

4.2.1 区域分布格局

中国铍矿资源呈现出“两带一区”的分布格局。阿尔泰伟晶岩带拥有新疆的可可托海和白杨河等大型矿床，铍储量占全国的60%；松潘-甘孜伟晶岩带则包括四川九龙的打枪沟和康定的甲基卡等矿床，铍资源量超过50万吨；而华南火山岩带则以湖南的香花岭和江西的幕阜山等矿床为代表，铍以绿柱石的形式赋存于交代蚀变的花岗岩中。资源特点以共伴生矿为主，品位较低，成分复杂，提纯难度大。例如，新疆白杨河铍矿平均品位0.5%，且伴生铀等金属，开发技术要求高^[4]。中国是全球第三大铍生产国，2024年产量占全球总产量的21%。但国内铍资源产量无法满足自身需求，对外依存度高达87%，主要进口来源国包括哈萨克斯坦、马达加斯加、埃塞俄比亚、美国、挪威等。

4.2.2 成矿时代与构造背景

中国铍矿的成矿高峰期为中生代燕山期（140-65Ma），与大陆边缘岩浆弧活动密切相关。伟晶岩型铍矿的形成主要发生在碰撞造山带的后碰撞环境，岩浆分异过程中铍在残余熔体中富集；而火山岩型铍矿则与早白垩世古太平洋板块俯冲引发的弧后伸展作用相关，铍以热液的形式沉淀于火山岩裂隙中。

4.3 铍矿成矿机制与模式

4.3.1 伟晶岩型铍矿

伟晶岩型铍矿的成矿过程可以分为四个阶段。首先是源区富集阶段,地幔部分熔融形成原始岩浆,并在上升过程中混染地壳物质导致铍等成矿元素富集;其次是岩浆分异阶段,岩浆在深部经历高度分异形成富铍残余熔体;随后是脉动侵入阶段,残余熔体沿构造裂隙多次侵入形成伟晶岩脉群;最后是结晶分异阶段,晚期热液活动导致绿柱石、羟硅铍石等矿物结晶并伴随钠长石化、云英岩化等蚀变现象。

4.3.2 火山岩型铍矿

火山岩型铍矿的成矿模型以“层控热液型”为代表。火山喷发形成高硅流纹岩火山穹窿为铍矿化提供容矿空间;岩浆期后热液携带铍等成矿元素沿火山岩裂隙运移;当热液物理化学条件改变时,铍以羟硅铍石的形式沉淀下来形成层状、透镜状矿体。

5 稀有金属矿产资源勘查开发建议

5.1 勘查方向优化

针对稀有金属矿产资源的勘查方向进行优化是提升资源发现率的关键。深部找矿是重要方向之一,针对大型伟晶岩型矿床开展三维地质建模与深部钻探工作,探索“第二找矿空间”;综合勘查方法的应用也至关重要,利用高精度磁法、电磁法与激电中梯等物探方法结合土壤地球化学测量技术圈定成矿远景区;同时加强伴生矿的评价工作,提升锂、铍矿床中共伴生铌、钽、稀土等元素的综合回收利用效率。

5.2 开发技术突破

开发技术的突破是提升稀有金属矿产资源利用效率的关键。针对盐湖提锂技术难题研发吸附法、膜分离法等高效提锂工艺解决高镁锂比盐湖开发难题;开发微生物浸出、选择性磨矿等新技术实现低品位铍矿的经济开

发;推广充填采矿法、溶浸采矿法等低损伤开采技术减少对生态环境的破坏。

5.3 资源战略保障

为保障国家稀有金属资源安全需从国际合作、储备体系构建和产业链协同三方面入手。加强与南美“锂三角”、澳大利亚等资源大国的合作建立稳定的海外资源供应基地;完善国家稀有金属储备制度建立“战略储备+商业储备”双层体系;推动稀有金属开采、冶炼、加工一体化发展提升产业附加值与国际竞争力。

结语

锂、铍作为典型稀有金属其资源分布具有显著区域集中性与时代特异性。锂矿以盐湖卤水型和伟晶岩型为主导成矿时代集中于新生代与中生代;铍矿则以伟晶岩型和火山岩型为主成矿高峰期中生代燕山期。稀有金属成矿机制与地质演化密切相关。盐湖型锂矿受控于封闭盆地构造与干旱气候条件伟晶岩型锂/铍矿则与岩浆分异-交代蚀变过程相关火山岩型铍矿形成于弧后伸展环境。未来稀有金属资源勘查应聚焦深部找矿与综合勘查开发技术需突破低品位资源利用与绿色开采瓶颈同时通过国际合作与储备体系构建保障国家资源安全。

参考文献

- [1]王汝成,邬斌,谢磊,等.稀有金属成矿全球时空分布与大陆演化[J].地质学报,2021,95(01):182-193.
- [2]窦立荣,刘化清,常德宽,等.全球锂资源分布、产业现状和中国面临的挑战与对策[J].中国科学院院刊,2025,40(03):494-510.
- [3]崔荣国,许憬秋,郭娟,等.全球锂矿分布特征、供需格局和展望[J].中国矿业,2025,34(02):410-417.
- [4]张森,鞠楠,伍月,等.铍矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J].中国地质,2023,50(02):410-424.