

全球锂铍铌钽矿产资源勘探开发新进展

吴西顺¹, 王登红², 成艾颖³, 苗淼^{4,5}, 杨添天⁶, 姚翔⁷

(1. 中国地质调查局地学文献中心, 中国地质图书馆, 北京 100083; 2. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 5. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 6. 北京电子科技职业学院, 北京 100176; 7. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。锂铍铌钽, 既是重要紧缺性稀有金属, 也是新兴战略性新兴产业的关键矿产, 在成矿规律和勘探开发领域既有共性也有个性并新的发展。本文力求尽量全面和准确地衡量和评价锂铍铌钽全球资源量和储量数据, 及时反映勘探开发新形势和技术新进展。花岗伟晶岩多旋回成矿理论获得重要勘探突破, 南美盐湖锂矿技术产量双释放临近, 粘土岩和地热卤水提锂增储潜力巨大, 碱性-过碱性火山成因-伟晶岩侵入型铌钽成矿在美洲和青藏地区研究深入, 中国锂铍矿勘探获重大系列突破, 鄂西北铌钽稀土等资源基地建设或可借鉴北美 Nechalacho 铌钽稀土矿床的勘探和开发经验。本文基于锂铍铌钽矿床和典型案例剖析, 提出多期热事件多旋回岩浆分异出熔可能是大型-特大型矿床的关键条件。

关键词: 矿业工程; 锂铍铌钽; 成矿理论; 勘探开发; 全球热事件; 巨型矿床

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.04.001

中图分类号: TD15 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 04-0001-10

引用格式: 吴西顺, 王登红, 成艾颖, 等. 全球锂铍铌钽矿产资源勘探开发新进展[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 1-10+20.

WU Xishun, WANG Denghong, CHENG Aiyang, et al. New progress in exploration and development of global li-be-nb-ta resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 1-10+20.

锂铍铌钽, 在当今世界既是重要紧缺性稀有金属, 也是新兴战略性新兴产业的关键矿产, 被广泛应用于高能电池、储能材料、航空航天、绿色核能等多个新兴领域^[1]。锂, 最早发现于1817年的瑞典, 现因性能优良而享有“工业味精”、“宇航合金”、“能源金属”、“白色石油”、“绿色稀有金属”^[1-5]等美誉。当前, 全球锂价进入动荡调整期。中国锂需求量大, 是全球第一消费国和贸易国^[6], 对外依赖度在2022和2023年分别为64%

和68%, 呈现上升趋势。而且进口集中度很高, 全球主要锂精矿来源澳大利亚(95.4%)和巴西(4.6%)的95%以上被中国包销^[5]。2022年我国碳酸锂表观消费量47.43万t, 净进口12.57万t, 其中智利12.17万t, 阿根廷1.28万t, 两国占总进口98.9%。南美“锂三角”对中国的战略重要性日益凸显, 但南美“锂佩克”保护主义抬头, 将受其影响^[7]。澳洲、加拿大等有良好的环境和优质资源的国家多在以美国为首的“五眼联盟”影响范围内,

收稿日期: 2023-12-30

基金项目: 中国地质大调查项目(DD20230139、DD20221794); 青海省盐湖地质与环境重点实验室开放基金(青海省盐湖地质与环境重点实验室奖励经费2022—2024)

作者简介: 吴西顺(1975-), 男, 博士, 副研究员, 现主要从事矿产资源、矿业科技、非常规能源和产业政策的科研工作。

中国企业在可以预见的将来或难触及核心价值而海外投资受到一定限制和竞争。

铍, 金属加工性能优越, 温度变化几百度仍能保持原尺寸而用在高精尖仪器如 James Webb 太空望远镜上。氧化铍陶瓷被用于导弹制导系统、雷达和手机发射器; 用于磁共振成像 (MRI)、医疗激光和便携除颤器等关键医疗技术。复合材料中用来掺杂砷化镓作为 5G/6G 通信材料。铍更是可控核聚变的关键原材料, 在我国科学家自主研制“人造太阳第一壁”中直接面对上亿度高温。2012—2014 年中国铍金属表观消费量 90 t 左右, 产量只有 50 t 左右, 其余全部依赖进口, 对外依存度高^[8-9]。但美国 Materion 公司高度垄断该行业, 可见中国的铍资源勘探开发尤为重要。

铌钽在战略新兴产业意义重大。铌是航空航天工业超级合金等热防护材料, 具有优越的超导性能而用于粒子加速器、核磁共振仪等; 钽则用于手机、计算机硬盘等高端电子设备和心脏起搏器等 3D 打印可植入医疗装置等^[10]。2022 年我国钽对外依存度近 93%, 2015—2022 年钽对外依存度始终高于 99%^[6]。

1 锂铍钽资源勘探开发格局变量增大

1.1 伟晶岩、黏土型增储与卤水锂放量并存

锂资源按成矿类型主要包括盐湖卤水型 (58%)、伟晶岩型 (26%)、粘土型 (7%)、油田卤水型 (3%)、地热卤水型 (3%)、锂沸石型 (3%)^[11-13]。粘土型储量增长显著, 主要发生在北美洲。2023 年锂矿勘探领域最大的进展莫过于美国内华达和俄勒冈两州交界处的 Mc Dermitt (King Valley) 锂矿床的新发现, 导致该矿床资源量从 2022 年的 537.3 万 t 增加到 2023 年 2 000~4 000 万 t 比肩于玻利维亚的 1 020 万 t 金属锂, 甚至最高可达 1.2×10^4 万 t。伊利石含锂 1.3%~2.4%, 整个火山口推定推测矿石资源量 30 亿 t, 品位较低 1.83%~1.87%。加上周边 Bonnie Claire (345.15)、Clayton Valley (54.98)、Thacker Pass/Lithium Nevada (144.64) 等矿床, 内华达盆地锂金属总量可达 2 544.77 万~4 544.77 万 t。墨西哥西部 Sonora 盆地的锂粘土矿, 锂资源量为 165.64 万 t 将成为重要锂矿资源地。墨西哥地质局正在勘探一个兼具粘土和卤水的锂钾项目等。与此同时, 中国滇黔贵和青藏高原及才大幕盆地也发现存在较多粘土

型锂矿床。

目前, 锂矿产量主要是来自澳大利亚的伟晶岩型锂辉石 (47%) 和智利 (30%)、中国 (12%) 和阿根廷 (5%) 的盐湖卤水^[14]。其中全球的伟晶岩型包括锂辉石和锂云母等主要分布在青藏高原华南、西澳克拉通和非洲等。近年, 我国锂矿等稀有金属找矿工作在川西、昆仑、阿尔金、慕阜山、喜马拉雅、江西—湖南等成矿带实现重大突破。西澳 8 个矿山有 5 个在产、1 个待复产, 北领地 1 个在产, 均为锂辉石类型, 其中仅 Greenbushes 矿山由天齐锂业持有 26% 权益 (与一致行动方 IGO 合计持有 51%)、Mt Marion 矿山由赣锋锂业持有 50% 权益以及部分矿山中资企业有包销货权, 其他多为西方资源商主导。从投资环境看, 澳大利亚已具备了一套成熟高效的覆盖“勘探-开发-销售”环节的法律法规/产业政策/资本市场准入机制。五矿证券研究所调研显示, 除放射性铀矿和部分油气资源归联邦政府所有外, 矿产勘探和开发主要受州层面监管并发放许可。西澳作为世界锂资源富集区, 主要依据 1978 年矿业法及 1981 年矿业条例进行矿业管理。由于锂辉石生产高效和政策发力, 2022 年全球约 47% 的锂供应量来自西澳。非洲已探明锂资源量主要分布于刚果 (金)、马里、津巴布韦、纳米比亚、加纳、南非、埃塞尔比亚和摩洛哥等国, 如 Manono、Goulamina、Bikita、Arcadia、Zulu、Karibib、Ewoyaya、Blesberg 和 Kenticha 等锂矿增储潜力大。南美硬岩锂矿业储量较大, 特别是巴西不但钽钽储量丰富, 锂储量也位列世界第 8。巴西的锂矿主要集中于东部和东南部, 其中米纳斯吉拉斯州的 Jequitinhonha 山谷有“锂谷”之称, CBL 的 Mina da Cachoeira 锂矿-锂盐一体化项目、AMG 的 Mibra 和 Sigma-Groto do Cirilo 锂矿在产, Oceana Lithium 的 Solonopole 锂矿 (东北部塞阿拉州)、Atlas Lithium 的 Minas Gerais 和 Northeastern 锂矿、Latin Resources 的 Salinas 锂矿、Lithium Ionic 的 Itinga 锂矿处于勘探阶段。

卤水锂矿, 在世界探明总资源量中占比达 65%, 由于其易于开采, 成本较低, 南美锂三角为世界主力产区, 但将来可能面临资源民族主义和“锂佩克”的影响。盐湖卤水主要分布在地球动力活跃、气候干旱、表层蚀变矿化以及利于形成湖泊的区域, 典型地区有南美蒂普拉诺—普纳

(Altiplano—Puna) 高原(如 Atacama、Uyuni 和 Hombre Muerto 等), 北美西部盆岭省(如 Silver Peak、Searles), 中国柴达木盆地、青藏高原(如大柴旦、一里坪、东/西台吉乃尔等)、拉萨地块山间低谷(如扎布耶、当雄措等)^[15]。Atacama 盐湖, 锂盐产量占 2022 年全球锂资源供给份额约 27%, 未来国有铜业 Codelco 将介入与 SQM 和雅保的谈判, 租金上涨, 利润下降, 股份重洗。智利政府还将引导和催化 Codelco 和 Enami 等国企对 Maricunga 等 5 个新盐湖的开发投资, 更多小盐湖 2024 年也将面向私营公司的开放。在生产效率方面, 卤水提锂的技术创新在中国和美洲的盐湖持续推进, 特别是阿根廷盐湖技术突破和产能潜力很大。阿根廷锂矿资源集中在 Salta、Catamarca 和 Jujuy 三省, 绿地项目 30 多个, 有 JEMSE、POSCO、力拓、紫金矿业、赣锋锂业和雅保等公司参与; 但在产盐湖开发商仅有 Livent、Allkem (原 Orocobre) 和美洲锂业 3 家, 当前正形成以 Hombre Muerto 和 Cauchari Olaroz 盐湖整装开发为主, 其他盐湖散装分布为特点的产能聚集区。玻利维亚 Uyuni 和 Oruro 盐湖的开发, 卤水浓度与组分稍低于智利和阿根廷, 但资源量巨大, 2023 年迎来 CBC (宁德时代持股 66%、洛阳钼业 34%) 与 Yacimientos de Litio Boliviano (YLB) 正式签署协议, 一期计划投资 14 亿美元合建 2 座 DLE 锂盐加工厂。周边还有 Coipasa 和 Pastos Grands 等盐湖, 但未实现规模工业化开发。中信国安与俄罗斯原子能国有公司 (Rosatom) 也将分别投资 8.57 亿和 5.78 亿美元投资 Uyuni 盐湖, 其中 Rosatom 通过 Uranium One Group 投资产能 2.5 万 t 碳酸锂, 规划 2025 年建成。

非常规卤水发展较快。地热卤水锂资源充沛, 国外多为氯化钙型卤水, 二氧化硅含量较高, 镁锂比和硼含量双低, 如德国、法国和意大利绵延几百公里的上莱茵地堑, 是轰动世界的示范工程。其地热含锂卤水勘探技术创新已利用二维地震剖面升级为三维地震模型, 特别是 Vulcan 锂矿的直接提锂 (DLE) 技术与地热发电技术融合实现绿色“零碳”目标。美国最大的地热卤水潜力区是索尔顿湖, 卤水中平均锂浓度高达 202 mg/L, 镁锂比仅 0.54。墨西哥 Baja California 州的地热发电卤水提锂由 Pan American Lithium 在研。国内的地热卤水多属于氯化钠型, 例如西藏地热卤水资源丰沛, 锂含量超过 15 mg/L 的富锂温

泉至少有 26 处, 其中一处达到 79.9 mg/L。油田卤水国外多属氯化钙型, 加拿大、美国和德国等国家均有分布, 镁锂比和硼含量以及二氧化硅含量均较低。国内油田卤水也多属于氯化钙型、镁锂比低, 但硼含量高, 主要分布在柴达木盆地、四川盆地、江汉盆地和江西吉泰盆地等^[16]。

1.2 铍资源西方维持垄断, 中国勘探进展快

铍矿主要有伟晶岩型、矽卡云英岩型、火山成因型、碳酸岩型和热液变质沉积型五种, 全球金属资源量超 10 万 t, 60% 在美国, 其余有巴西、俄罗斯、加拿大、哈萨克斯坦、印度、中国和非洲。美国主要分布在犹他州斯波尔山区、内华达州麦卡洛山脉, 其中犹他州已探明铍储量 1.8 万 t。巴西主要是绿柱石, 米纳斯吉拉斯州戈伟尔纳多—瓦拉达雷斯伟晶岩矿床的绿柱石矿石储量为 38.6 万 t。叶尔马科夫斯克 (Yermakovskoye) 矿是俄罗斯最大的铍矿床, 储量约 1 万 t, 尚有剩余储量, 平均品位 1.3% BeO。2004 年前我国自俄罗斯进口, 2004 年后是南美和非洲, 近年因美国高价竞购, 转移到非洲, 供应逐年增加, 品位也较好^[17]。西方铍供应稳定, 保持垄断地位, 且禁止铍金属出口。

近年中国铍矿勘探进展较快, 湖南仁里、新疆大红柳滩、西藏喜马拉雅、青海茶卡北山有找矿新突破。但中国铍资源多共伴生, 其中锂铌钽共伴生 (48%), 稀土伴生 (27%), 钨矿共伴生 (20%)。一方面综合开发利用可降低成本, 另一方面加工处理工艺具有很大挑战。花岗伟晶岩型是主要类型, 占储量 50% 以上, 分布在新疆阿尔泰、川西松潘—甘孜和南岭成矿带。2017 年底, 工业可采储量 1.43 万 t BeO, 其中新疆、内蒙古、云南和四川占全国 89.5%, 新疆最多约 1/3^[9]。最近新矿物铌包头矿 (发现于 2012 年) 获国际矿物学会认可, 变成可鉴别矿石, 目前探明铍矿石储量 660 万 t 居全球世界第 2, 但需攻克采选回收工艺问题。

1.3 铌钽赋存岩性集中, 碳酸岩碱性岩伟晶岩占主导

在铌钽矿的赋存岩性类型中也有不同规律 (图 1), 碳酸岩和碱性岩 (Nb>Ta), 碱性-过碱性花岗岩和正长岩 (Nb>Ta), 而 LCT 稀有金属花岗伟晶岩中 (Ta>Nb)^[18]。次生矿床开采成本更低, 并且比原生硬岩矿床具有更高的品位, 因此次生矿床特别受到关注。

碳酸岩在国外有时被用来考虑 Ta 和 Nb 综合开发,例如加拿大 Upper Fir (控制资源量 4 840 万 t, Ta_2O_5 品位 197×10^{-6} , Nb_2O_5 品位 $1\,610 \times 10^{-6}$) 和 Crevier 碳酸岩-正长岩杂岩体内的碱性伟晶岩墙 (Nb_2O_5 品位 0.2%, Ta_2O_5 品位 0.023 4%, 控制和探明资源量 253.69 万 t)。然而,碳酸岩精矿中 $\text{Ta}_2\text{O}_5/(\text{Ta}_2\text{O}_5+\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 比值低于伟晶岩,因此需要开发出新的非常规提取方法才能实现综合开发。碱性岩浆是化学上未亏损的深层地幔中低程度部分熔融的产物。因此,碱性岩浆富含的不相容元素(包括 HFSE),随着岩浆的冷却和结晶会进一步富集聚集在演化程度最高且富含挥发分的花岗岩和正长岩熔体中结晶。由于 HFSE 形成相对致密的矿物,它们可以通过晶体沉降堆积成层,并被岩浆或新注入物质搬运和混合。许多碱性火成杂岩具有广泛热液蚀变的证据,和 HFSE 和 REE 的高含量特征。例如格陵兰加达尔火成岩省的 Motzfeldt 侵入体具有热液蚀变正长岩带,含 Nb-Ta-REE 土烧绿石矿化,是目前勘探的重点。

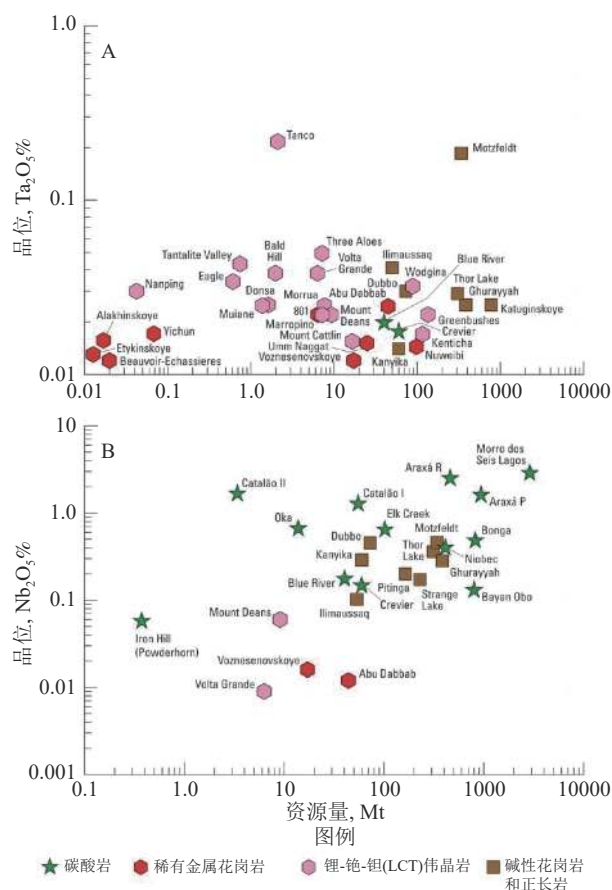


图1 全球铌钽矿床品位和吨位(按矿床类型)^[18]
Fig.1 Global grade and tonnage of niobium-tantalum deposits (by deposit type)

稀有元素伟晶岩富含高场强元素(HFSE)(如 Ta、Nb、Zr、Hf 和 P)和大离子亲石元素(LILE)(如 Rb、Cs、Li、Sr)。此类型伟晶岩的 Ta 勘探潜力最大。其中 LCT 型稀有元素伟晶岩 Li、Cs、Be、Ta 和 Nb 含量、Ta/Nb 比值和钠长石化程度随距母岩侵入体距离增加而增加^[19]。随着铌和钽勘探方法的优化,有望会有新矿床被发现。近期一些重大突破包括:定制和优化了便携式 X 射线荧光的使用,从而在野外直接进行精准金属化学分析^[20];优化了基于指示矿物的勘探方法探测钽铌矿化^[21];以及使用生物地球化学勘探方法。用于这些改进方法的实验地点位于加拿大的科迪勒拉山系(Cordillera),包括 Aley 碳酸岩矿(Nb_2O_5 品位为 0.50%,证实和概略储量为 8 380 万 t)和 Upper Fir 碳酸岩)。Thomas 等(2016)对现代地球物理技术,特别是重力、磁法和放射性测量等在勘探侵入岩型稀有金属矿床(含 Ta 和 Nb)中的应用进行了全面综述,展示了如何利用这些方法圈定赋存稀有金属侵入体、三维建模以及如何更好地聚焦于矿化,如 Oka 碳酸岩杂岩体、Tanco 伟晶岩矿以及 Nechalacho 和 Strange Lake 过碱性侵入体^[22]。

2 锂铍钽成矿规律获深时数据支持

深时数据一般是指地质年代比较久远的地层或者岩体的相关地质学和分析化验数据。地球历史上大致经历了 5 次超大陆聚合与裂解(即超大陆旋回)过程,包括前寒武纪基诺拉(Kenora)超大陆(2.7~2.5 Ga)、努纳(Nuna)或哥伦比亚(Columbia)超大陆(2.1~1.8 Ga)和罗迪尼亚(Rodinia)超大陆(1.3~1.0 Ga)、显生宙冈瓦纳(Gondwana)超大陆(0.54~0.4 Ga)和潘吉亚(Pangea)超大陆(0.3~0.2 Ga)等。许多研究表明,超大陆旋回是板块俯冲、造山作用、大陆裂解、地幔柱活动及金属成矿等多过程的有机统一。

锂铍钽在超大陆旋回的深时空分布呈现特定规律。原生锂铍钽矿床相应可分为五种类型:(1)花岗伟晶岩型;(2)花岗岩型:过铝质花岗岩和淡色花岗岩;(3)碱性花岗岩型,常与正长岩有关;(4)霞石正长岩型;(5)碳酸岩型。特别地,其元素在成因上和空间上与广义碱性岩浆杂岩密切相关(表 1)。基诺拉旋回(>2.25 Ga)中仅含有伟晶岩型矿床。钠长石和钠

长石-锂辉石稀有金属伟晶岩，含钽铁矿-铌铁矿、
细晶石和伊利石。年龄是 2.99~3.08 Ga。虽锂-钽-

锡矿石质量不佳且富集规模小，但可被视为亲石
稀有金属（如 Ta）成矿过程开始的标志（图 2）。

表 1 大型超大型锂铍铌钽矿床类型
Table 1 Types of large super-large lithium-beryllium-niobium-tantalum deposits

类型	矿体位置	赋存矿种	大型和特大型矿床实例
伟晶岩型	大部分成群成雁列型式沿走向和 倾向分布，有时独立存在	锂、锡、铍、钽、铷、钽、铌	Greenbushes, Wodgina, Vishnyakovskoe, Kenticha
花岗岩型	位于锂-氟花岗岩顶部，岩株状， 有时板状块体	锡、锂、萤石、铍、铷、铌、钨	Nuweibi, Etyka, Echassieres, Abu Dabbab
碱性花岗岩型	矿化在整个碱性花岗岩、正长岩、粗面 斑岩岩株和熔岩凝灰岩层中几乎均匀分布	铌、锆、稀土、锡、萤石、 冰晶石、铀、锂	Ulug-Tanzek, Ghurayyah, Pitinga, Toongi, Halzan Buregtei
霞石正长岩型	矿化层在层状钠质杂岩剖面中重复出现； 岩墙，霞石正长岩的伟晶岩中也发育矿化	锆、稀土、铌、钽、钽、铀	Tanbreez, Lovozero, Nechalacho, Motzfeldt
碳酸岩型	碳酸岩杂岩或相邻硅酸盐矿化体及风化壳	铌、钽、磷、稀土、铁、铀	Mabouni, Upper Fir, MtWeld

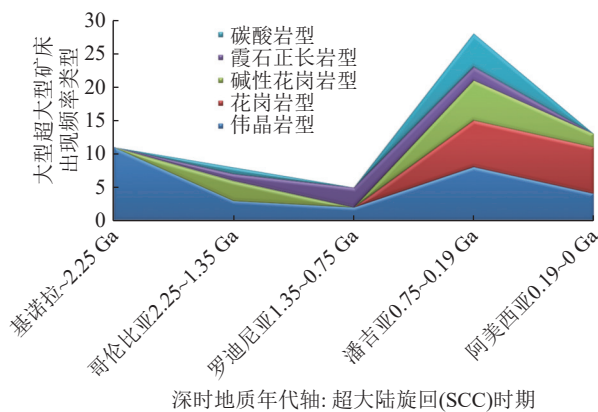


图 2 大型超大型矿床在深时空地质中的出现频率
Fig.2 Frequency of occurrence of large mega deposits in
deep-time geology

哥伦比亚旋回（1.35~2.25 Ga）矿床类型比基
诺拉旋回丰富，有一半以上属于碱性花岗岩岩浆
成因。如 Pitinga 矿床（Guiana 地盾），钽是锡石
砂矿和铌铁矿、锡-Nb-Ta-Zr-氟-REE 矿脉的伴生
成分^[23-24]。Thor-Lake 杂岩（Slave 克拉通）的 Necha-
lacho Zr-REE-Nb-Ta 层状矿床是霞石正长岩型矿
床，就资源规模而言非常重要，褐钨铌矿和铌铁
矿是主要含铌矿物。

罗迪尼亚旋回（0.75~1.35 Ga）与其他旋回不
同，因为该旋回中 Ta 资源几乎全为霞石正长岩
型，烧绿石是主要载体。潘吉亚旋回（0.19~0.75
Ga）是目前已知的唯一拥有全部 5 种大型和超大型
钽矿床的旋回（图 3），主要是碱性花岗岩类矿
床。烧绿石和铌铁矿都有 Zr-REE-Nb-Ta 矿化，是
所有旋回中资源最集中的类型。这一期碳酸岩型
矿床最为丰富，可作为碳酸岩类型的代表，大多
数形成于旋回的开始阶段。

阿美西亚旋回（<0.19 Ga）还远未结束，自其

开始以来由三种成矿类型代表。碱性花岗岩类占
比最大。花岗岩型数量最多，最古老的是中国华
南香花岭（Sn-Ta-W-Be）、大吉山（W-Ta）和宜
春（Li-Ta）矿床。外贝加尔（Transbaikalian）成
矿带的两个大型和超大型矿床中，即 Etyka 和 Orlo-
vka，这两个地区都曾经有过开采记录，但目前这
些矿已经全部停产。在东喜马拉雅带的 Baihuanao
（百花脑）侵入体（Ta、Sn、Li）和科迪勒拉（Cor-
dillera）成矿带 Kougarak 侵入体（锡、Ta、锂）
的晚白垩世 Li-F 淡色花岗岩。伟晶岩型大型和超
大型钽矿床位于两个成矿带，分别是外贝加尔
（Zavitinskoe）和兴都库什（Parun 和 Taghawlor）。

3 多期多旋回热事件成矿模式

对某一区域构造和岩浆作用的仔细研究，可
以理解各种成矿条件的形成规律如热事件
（ETs），进而可以预测巨型特大型矿床在该区域
形成的概率大小^[25]。稀有金属伟晶岩共分三类：
①LCT 型伟晶岩，富集 Li-Cs-Ta 元素（即 LCT），
以富集 Li 为特征；②NYF 型伟晶岩，以富集
Nb、Y 和 F 元素（即 NYF）为特征，同时富 HR-
EE、Ti、U、Th 等，Nb>Ta；③LCT-NYF 混合型
伟晶岩。其中，LCT 型伟晶岩在化学成分上类似
于 S 型花岗岩，其花岗质母岩往往是过铝质，但
铝饱和指数有时小于 1.1，可能是 S 型花岗质熔体
进一步分异，过多斜长石和富铝矿物的聚集/分
异，使得铝饱和指数下降。而 NYF 型伟晶岩则类
似于 A 型花岗岩。S 型花岗岩往往起源于俯冲或
陆-陆碰撞活动引起的壳内物质重熔，其源区与泥
质岩石在地质过程中经历了多期多旋回富集成矿
作用（图 3、4）。

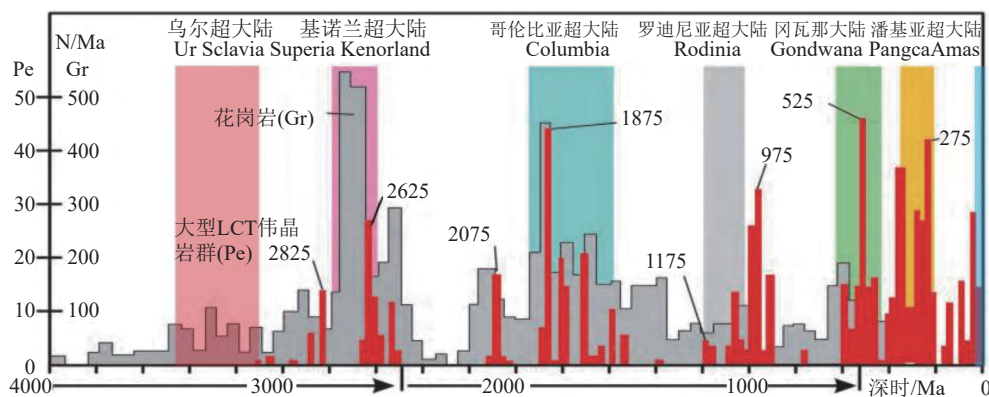
图3 稀有金属伟晶岩与花岗岩深时关系^[26]

Fig.3 Rare metal pegmatite and granite deep-time relationships

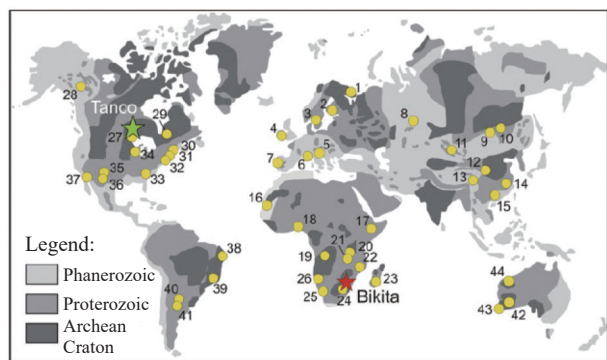
图4 全球克拉通与伟晶岩矿床时空关系^[25]

Fig.4 Spatial and temporal relationship between global Craton and pegmatite deposits

长期以来,人们通常认为,携带沉积物和海水的大洋板块在俯冲过程中会因脱水熔融作用而释放大量锂,这些锂随着流体上升而进入上覆地幔楔,并富集于岛弧岩浆中。如 Richards (2013) 认为,俯冲或碰撞环境可以触发或形成岩浆作用明显但可能很短暂的富金属构造条件,特别是活性强的围岩也可形成化学圈闭来沉淀矿物。此外,流体汇聚或封闭可能形成构造控制的高品位成矿或不渗透盖层下的流体圈闭^[26]。

但新近研究表明,俯冲板块对弧岩浆中锂的贡献非常有限,而 Li 元素富集的主要贡献可能来自壳内岩浆的高度演化及弧地壳加厚环境下地幔楔熔融程度降低融入 Li,但本质都是不同程度热事件多期演化的结果。这是因为, Li 离子半径小,不相容性强,在岩浆体系中随结晶分异程度加强而在残余熔体中不断富集(图5);而地幔楔部分熔融程度的降低会促使锂等不相容元素进入熔体,从而导致岩浆中锂含量明显升高^[12]。

LCT 型伟晶岩通常是规模小(几百米)的花

岗岩侵入体,其特征是晶粒极粗但大小不等,并富集 Li、Rb、Cs、Be、Ta 和 Nb (Ta>Nb)^[27-28]。它们是高分异富挥发份花岗岩浆的产物,通常来自稀有金属花岗岩。通常它们出现在母体花岗岩侵入体顶部周围的接触变质带中,矿化的和分异程度最高的伟晶岩则位于距离顶部最远的位置(图5)。大多数 LCT 型伟晶岩是同心带状,但分带不规则,通常具有薄的边界带、围岩带、过渡带、钠长石带和核部^[29]。钽矿化主要集中在过渡带和钠长石带,一般由钽铁矿-钽铁矿、钽钽矿、细晶石和(或)锡钽钽矿组成。还可能存在其他矿化,包括 Be (绿柱石)、Cs (铯榴石)、Li (锂辉石;透锂长石以及锂云母)、Sn (锡石)和一些宝石。LCT 型伟晶岩还可进行钠长石、白云母、钾长石和超纯石英的开采。与其稀有金属花岗母岩一样,全球各地也广泛分布有 LCT 型伟晶岩(图4),年代范围为太古代-中生代,但在大陆碰撞和超大陆拼合时期尤为集中^[30-31],如澳大利亚的格林布什(Greenbushes)、沃吉纳(Wodgina)矿床和加拿大的坦科(Tanco)矿床。

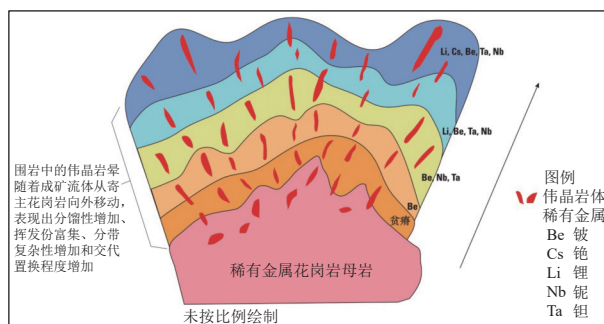
图5 岩浆演化与稀有金属分异机制^[25]

Fig.5 Magmatic evolution and rare metal differentiation mechanisms

郭春丽等^[32]（2024）认为，花岗岩锂成矿的三个重要条件是：岩浆房内部高度分异、岩浆房顶部完好封闭和岩浆房底部持续加热。具体过程包括：①下地壳基底受幔源岩浆加热发生部分熔融形成初始岩浆，在逐级上升过程中不断分异，导致酸性程度提高、稀有金属元素和挥发分富集；岩浆随着矿物的梯次结晶和冷却逐渐向低温方向演化，岩浆房形成下部富堆晶体、中部富碱性长石、上部富云母石英结构；②炽热的岩浆在岩浆房顶部遇到冷的围岩而最早发生冷却固结形成伟晶岩壳，其良好的封闭条件起到阻隔锂、氟、磷等易挥发组分逃逸的作用，并使得岩浆房内含矿熔体得以持续发生结晶分异作用；③较早形成伟晶岩壳构成的封闭环境使下部残余岩浆中的挥发分不断上升并聚集于其下，促成含矿岩浆顶部发生云英岩化，进而形成云英岩型和碱性程度不同的钠长石花岗岩型矿体^[32]。笔者认为，这个过程也会经历不同时期的多次热事件影响，从而各类岩浆在下伏热影响和断裂诱发下向上侵入形成3类岩脉：基性岩脉，来自同位素亏损/富集的幔源岩浆；贫矿中酸性岩脉，来自岩浆房底部堆晶体重熔；含矿酸性岩脉，来自岩浆房顶部稀有金属元素富集的岩浆-热液。综上所述，多期热事件多旋回热事件的作用会形成现实中极其复杂的成矿模式。

4 大型特大型矿床勘探开发经验与启示

本文基于全球1396个典型锂铍铌钽矿床和典型案例剖析，深入挖掘大型特大型矿床的勘探开发经验与启示，现总结如下。

（1）公益调查与商业勘探统筹协调发展，探采一体化和央地企协同开发。国家基础调查机构常在重大矿床发现的早期阶段发挥重要引导作用。在这方面，美国地质调查局和加拿大地质调查局效果显著。例如，加拿大Nechalacho矿是个世界著名的特大型铌钽稀土矿床。该过碱性侵入型矿床是全球第4大钽矿（4.5万t，2023）、第19大铌矿（47.2万t，2023），还富含轻重稀土3.12亿t（TREO）和锆石矿42.1万t。该矿床的发现源于加拿大地质调查局西北地区1971年航空基础物理辐射测量的后续调查，是对稀有金属矿床进行地面重力调查的典型病例。之后商业公司进入麦肯齐矿区，5年后海伍德资源公司在矿区发现铌和钽。1976—1979年，湖区、萤石、R区、

S区和T区的勘探项目包括钻探、地质填图、采样和挖探槽，最终发现了高品位的铌、钽、钇和稀土元素。美国地调局更是在世界最大的McDermitt锂矿床发现中发挥了重要基础公益性和引导作用。1975年，雪佛龙公司开始对麦克德米特火山口沉积层进行铀矿勘探。当时美国地质调查局（USGS）一直在调查锂矿的物源并提醒雪佛龙公司注意与破火山口有关的锂浓度异常。正因如此，该公司在1978年和1979年将锂添加到其样品分析中，开始粘土项目分析并获得了项目作业样本。分析结果证实了粘土中所含的高浓度锂。之后从1980年到1987年，雪佛龙公司开启了一项专注于锂靶区的钻探计划，并对粘土进行了大量的冶金测试以确定锂提取的可行性。1985年，雪佛龙公司以0.25%的锂为边界品位进行了第一次资源量估算。如今，Castor和Henry（2020）、Benson等（2023）基于大量钻探、地质调查和经济评价估算出McDermitt火山口的沉积物中含有约2000万~4000万t的原位锂，最高可达1.2亿t，世界规模最大^[14,33]。加拿大省级地质勘查机构也在斯特林奇湖的铌钽稀土矿早期勘探中发挥了重要作用。上文已述及，美国和加拿大地质调查局如何通过基础调查引导商业公司勘探，从而发现探明了多个巨型锂铍铌钽矿床。在数据共建共享方面，勘探化验分析数据与矿石采选冶数据的联通一体化对于高效完整产业链和供应链建设以及国家能源资源保障具有重要意义。同时，由于国内与国外的体制与机制不同，央企、国企和地方企业可以在矿业的不同环节协同发展，探索高质量韧性发展的规律。

（2）地热卤水和油田卤水的锂矿勘探类似于石油行业主要采用地震勘探、水文地质并结合三维建模方法，由于开采不同于固体矿产故适合深部找矿。盐湖卤水主要是成矿模型结合水文地质方法同时用钻探物探如瞬变电磁（TEM）、层析成像（ERT）和大地电磁（MT）等现代探测技术。花岗伟晶岩锂矿的勘探多为锂铍、锂钽共生，常用地质填图、航空物探和钻探取芯等。粘土型锂矿的勘探国外多为火山沉积型矿床，本质为古盐湖湖泊相粘土沉积叠加火山凝灰岩和断裂系统的热液成矿，所以多采用钻探物探如地震剖面结合测井和三维建模来圈定矿床和核算储量。中国境内的青海、西藏、四川、江西4个省（自治区）合计查明资源储量占全国总量的96%^[34]。

卤水型主要分布在青藏高原约占全国锂资源总储量的 80%^[35]。中国不但早有沉积岩型锂如贵州柿竹园和重庆奉节,且最近云南玉溪又新开钻的粘土型 500 万 t 氧化锂资源。中国地热卤水,青藏高原资源丰富,但高品位优质卤水储层尚待详细勘查。油田卤水多属于氯化钙型,分布在柴达木盆地、四川盆地、江汉盆地等沉积盆地。

(3) 国内外铍矿的勘探进展表现为近期中国进展较快,主要是锂铍共生矿。国外如加拿大奇异湖、美国斯波尔铍矿的勘探由于放射性故多采用地质填图、航空和地面放射性测量、地球化学采样分析和金刚石钻探等方法技术,其中地质填图对于地表露头结合钻孔取样能切实提高构造分辨率。在过碱性、碱性花岗岩和石英正长岩中,Be 的含量可以富集到 100 g/t 以上,而且与富 Be 碱性伟晶岩有关。加拿大斯特兰奇湖 (Strange Lake) 和托尔湖都具有伟晶岩特征的大型矿床形成于富稀有金属碱性岩发育的末期。两者都有复杂的内部结构并有明显的热液叠加,岩浆与热液作用对 Be 的富集是否重要存在争议。在托尔湖,以长石为主的“伟晶岩”中,晚期石英-萤石-多硅锂云母“云英岩”带中出现了硅铍石、羟硅铍石、硅铍钇矿和日光榴石。铍矿化晚于 Ta-Nb-Zr 矿化,二者均与布拉奇福德湖 (Blachford Lake) 杂岩体的正长岩、正长角砾岩和过碱性花岗岩有关。矿床形成时代晚于最年轻的正长岩侵入体。该侵入体位于同一杂岩体较老的碱性花岗岩中。在斯特兰奇湖,硅铍钇矿、白针柱石和整柱石产出在一个透镜体状矿带中,该矿带与富 Zr-Nb-Y 钠闪石花岗岩杂岩的最晚阶段有关。尽管对于成矿富集是基于岩浆作用还是热液作用这一问题,仍然存在争议,但是热液叠加作用很清楚。如今以托马斯破火山口为中心,渐新世火山沉降构造形成了东西走向火成岩带和矿床,被称规模巨大的“西犹他州铍成矿带”。近年,国内仁里、大红柳滩、茶卡北山锂铍矿勘探有新突破,开采也有进展。其实,中国的白云鄂博稀土矿也蕴藏着特大型铍矿,如何高分辨率地勘探建模和开发是形成产业链的重要一环。

(4) 国外铍钽矿的勘探技术区分为不同成矿类型,而因地制宜。巴西和加拿大两国是铍精矿的主要生产国,但是迄今为止巴西规模最大,占全球总产量约 90%,绝大部分产自碳酸岩风化物。加拿大奇异湖铍钽稀土矿床,属于过碱性、

碱性稀有金属花岗岩,在勘查过程中,由于 ICP-MS 方法的检测上限较低,公司就采用了 X 射线荧光 (XRF) 方法单独分析铍矿产资源的潜力而获得成功。澳大利亚和巴西一直是铍精矿的主要生产国,最近埃塞俄比亚和莫桑比克也成为铍资源的重要供应国。巴西拥有约 40% 的已查明铍资源;其他拥有探明铍资源的国家和地区,按储量降序排列,有澳大利亚、亚洲、俄罗斯、中东地区、非洲、北美和欧洲。碳酸岩是一个重要的勘探目标,因为它们赋存着大型通常可批量开采的铍资源 (铍含量较少)。大约 80% 的碳酸岩与硅酸盐岩石伴生,其中大部分是高碱性的^[36]。然而,并不是所有的碱性杂岩和岩浆岩都含有碳酸岩。碳酸岩优先集中在前寒武纪岩体中,并与陆内裂谷构造运动有关。

5 未来与展望

(1) 锂铍钽因其优异的物理化学特性被应用于新能源、新材料、信息技术和航空航天等众多领域,是新兴产业发展不可或缺的战略关键金属。就发展形势看,锂铍钽等关键金属矿产无疑在当今和未来的新能源领域和各大新兴产业应用中占有重要地位^[37]。

(2) 近年世界上关键矿产的全产业链融合进程加快,协同发展快速调整,从而锂铍钽矿产勘探与开发获得巨大赋能。例如 2023 年,国际大型汽车生产商加紧与矿商建立新的锂供应关系,如签署收购或长期合作协议,同时各国政府也在为推进锂铍钽等关键矿产提供资金和政策支持。其中,智利和阿根廷北部的阿塔卡马一个地区就与宝马、通用、福特、丰田、LG、JM 等汽车制造商和原始设备制造商签署了 10 项承购协议。澳大利亚的狮镇资源 Kathleen Valley 矿山分别与福特、Tesla 和 LG 等车企,签署 5 年期合同,涉及 200 万 t 锂辉石,布局深远。欧洲也签署了多项上下游合作协议,如德国的 Vulcan 地热卤水型锂矿涉及 Stellantis 公司 5 000 万欧元 (合计 7 230 万美元) 投资 8.1 万~9.9 万 t 氢氧化锂合同。目前,中资企业也在国内外关键材料产业链、价值链和供应链上进行优化部署和布局,以增强抵御全球市场变动的风险^[38]。

(3) 中国力量影响将稳步扩大和增强,其产业拥有特殊的世界市场影响力。纵观全球锂铍钽等关键矿产及新兴产业的发展格局,世界各地

常规和非常规矿产资源类型如雨后春笋般蓬勃兴起^[39]。中国政府层面“双碳”目标具有世界标志性，科研层面研究纵深发展，企业层面科学汲取全球典型大型-超大型矿床的勘查和开发经验，并在人工智能、先进传感技术等新技术革命中崭露头角，有望通过广泛而积极的国际化参与和市场开拓为改善全球气候问题和宜居生态环境做出巨大贡献。

参考文献：

- [1] 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 等. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向[J]. 地球科学, 2017, 42(12): 2243-2257.
WANG D H, LIU L J, DAI H Z, et al. Discussion on particularity and prospecting direction of large and super-large spodumene deposits[J]. Earth Sciences, 2017, 42(12): 2243-2257.
- [2] 徐璐, 杨耀辉, 颜世强, 等. 我国黏土型锂矿提锂研究现状及前景展望[J]. 矿产综合利用, 2023(4): 12-18.
XU L, YANG Y H, YAN S Q, et al. Lithium extraction from clay-type ore in China: status and prospects[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(4): 12-18.
- [3] 王登红. 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[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189-1209.
WANG D H. Study on critical mineral resources: significance, of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization and direction of exploitation[J]. Journal of Geology, 2019, 93(6): 1189-1209.
- [4] 许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 等. 新能源锂矿战略与大陆动力学研究[J]. 地质学报, 2021, 10: 5-22.
XU Z Q, ZHU W B, ZHENG B H, et al. New energy strategy for lithium resources and the continental dynamics research[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 10: 5-22.
- [5] 邢凯, 朱清, 任军平, 等. 全球锂资源特征及市场发展态势分析[J]. 地质通报, 2023, 42(8): 1402-1421.
XING K, ZHU Q, REN J P, et al. Research on the characteristics and market development trend of global lithium resources[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(8): 1402-1421.
- [6] 左更. 我国稀缺性战略金属资源保供稳供问题的思考——以钽、铌、铬、钴为例[J]. 中国国土资源经济, 2023, 36(9): 4-13+23.
ZUO G. Thinking on the problem of stable supply of scarce strategic metal resources in China—take tantalum, niobium, chromium and cobalt for example[J]. Natural Resource Economics of China, 2023, 36(9): 4-13+23.
- [7] 茹阳阳, 吴可仲. “锂佩克”呼声再起 全球锂供应体系深刻变局已开启[N]. 中国经营报, 2022-12-05(B08).
RU Y Y, WU K Z. The global lithium supply system has begun [N]. China Business News, 2022-12-05 (B08).
- [8] 邓伟, 颜世强, 谭洪旗, 等. 我国铍矿资源概况及选矿技术研究现状[J]. 矿产综合利用, 2023(1): 148-154.
DENG W, YAN S Q, TAN H Q, et al. General situation of beryllium ore resources and research status of mineral processing technology in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(1): 148-154.
- [9] 李娜, 高爱红, 王小宁. 全球铍资源供需形势及建议[J]. 中国矿业, 2019, 28(4): 69-73.
LI N, GAO A H, WANG X N. Global Beryllium supply and demand trend and its enlightenment[J]. China Mining Industry, 2019, 28(4): 69-73.
- [10] 邓攀, 陈玉明, 叶锦华, 等. 全球铌钽资源分布概况及产业发展形势分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(4): 63-68.
DENG P, CHEN Y M, YE J H, et al. Study on the resource distribution and industry development of global niobium and tantalum[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(4): 63-68.
- [11] 吴西顺, 王登红, 黄文斌, 等. 全球锂矿及伴生铍铌钽的采选冶技术发展趋势[J]. 矿产综合利用, 2020(1): 1-9.
WU X S, WANG D H, HUANG W B, et al. Global technical development trends of lithium minerals and associated beryllium-niobium-tantalum exploitation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(1): 1-6.
- [12] 吴西顺, 孙艳, 王登红, 等. 国际锂矿开发的技术现状、革新及展望[J]. 矿产综合利用, 2020(6): 110-120.
WU X S, SUN Y, WANG D H, et al. International lithium mine utilization technology: current status, innovation and prospects[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6): 110-120.
- [13] 隰弯弯, 赵宇浩, 倪培, 等. 锂矿主要类型、特征、时空分布及找矿潜力分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2023, 43(1): 19-35.
XI W W, ZHAO Y H, NI P, et al. Main types, characteristics, distributions, and prospecting potential of lithium deposits[J]. Sedimentary Geology and Tethys Geology, 2023, 43(1): 19-35.
- [14] T R Benson, M. A Coble, John H. Dilles, Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones [J]. Science Advances. 9, eadh8183 (2023).
- [15] 刘成林, 余小灿, 袁学银, 等等. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型[J]. 地质学报, 2021, 95(7): 2009-2029.
LIU C L, YU X C, YUAN X Y, et al. Characteristics, distribution regularity and formation model of Brine-type Li deposits in salt lakes in the world[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(7): 2009-2029.
- [16] 韩佳欢, 郑绵平, 乜贞, 等. 我国深层地下卤水钾、锂资源及其开发前景[J]. 盐湖研究, 1-11.
HAN J H, ZHENG M P, NIE Z, et al. Lithium and potassium resources of oilfield brine and development prospects in China [J]. Journal of Salt Lake Research, 1-11.
- [17] 梁飞, 赵汀, 王登红, 等. 中国铍资源供需预测与发展战略[J]. 中国矿业, 2018, 27(11): 6-10+17.

- LIANG F, ZHAO T, WANG D H, et al. Supply and demand forecast and development strategy of beryllium resources in China[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(11):6-10+17.
- [18] Schulz, K. J. , Piatak, N. M. , Papp, J. F. 2017, Niobium and Tantalum, chap. M of Schulz, K. J. , DeYoung, J. H. , Jr. , Seal, R. R. , II, and Bradley, D. C. , eds. , Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U. S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. M1– M34.
- [19] Trueman D. L. , Pedersen J. C. , de St. Jorre L. , et al. 1988. The Thor Lake rare-metal deposits, Northwest Territories. In: Recent Advances in the Geology of Granite-Related Mineral Deposits, Special Volume 39 (eds R. P. Taylor and D. F. Strong), pp. 280–290. The Canadian Institute of Mining and Metallurgy.
- [20] Simandl, G. J. , 2014, Geology and market-dependent significance of rare earth element resources: Mineralium Deposita, v. 49, p. 889–904, <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0546-z>.
- [21] Mackay, D. A. R. , Simandl, G. J. , 2015, Pyrochlore and columbite-tantalite as indicator minerals for specialty metal deposits: Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, v. 15, p. 167–178, <https://doi.org/10.1144/geochem2014-289>.
- [22] Thomas, M. D. , Ford, K. L. , Keating, P. , Review paper: Exploration geophysics for intrusion-hosted rare metals, European Association of Geoscientists & Engineers, Geophysical Prospecting, 2016, 64, 1275–1304.
- [23] Bastos, Neto A. C. , Pereira, V. P. , Ronchi, L. H. , et al. The world class Sn, Nb, Ta, F (Y, REE, Li) deposit and the massive cryolite associated with the albite-enriched facies of the Madeira A-type granite, Pitinga mining district, Amazonas state, Brazil, Can. Mineral. , 2009, vol. 47, pp. 1329–1357.
- [24] A. V. Tkacheva, D. V. Rundqvista, N. A. Vishnevskayaa. Global Metallogeny of Tantalum Through Geological Time, 2019. GEOLOGY OF ORE DEPOSITS Vol. 61 No. 6.
- [25] Dittrich Thomas, Thomas Seifert, Bernhard Schulz, et al. 2019. Archean Rare-Metal Pegmatites in Zimbabwe and Western Australia. Geology and Metallogeny of Pollucite Mineralisations. Springer, 1-94.
- [26] Richards, J. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes. Nature Geosci 6, 911-916 (2013). <https://doi.org/10.1038/ngeo1920>.
- [27] Frank Melcher, Torsten Graupner, Hans-Eike Gäbler, et al. Tantalum–(niobium–tin) mineralisation in African pegmatites and rare metal granites: Constraints from Ta–Nb oxide mineralogy, geochemistry and U–Pb geochronology, Ore Geology Reviews, Volume 64, 2015, Pages 667-719.
- [28] Černý, P. , London, D. , Novák, M. , 2012. Granitic pegmatites as reflections of their sources. Elements 8, 289–294.
- [29] Fetherston, J. M. , 2004. Tantalum in Western Australia. Mineral Res. Bull. , 22. Geological Survey of Western Australia (153 S.).
- [30] Bradley, Dwight, and McCauley, Andrew, 2013, A preliminary deposit model for lithium-cesium-tantalum (LCT) pegmatites: US Geological Survey Open-File Report 2013-1008, 7p. [Also available at <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1008/>.]
- [31] Bradley DC, McCauley A, Stillings LM (2017) Mineral-deposit model for Lithium–Cesium–Tantalum pegmatites. USGS Scientific Investigations Report 2010-5070-O, 48 pp.
- [32] 郭春丽, 张斌武, 郑义, 等. 中国花岗岩型锂矿床: 重要特征、成矿条件及形成机制[J]. *岩石学报*, 2024, 40(2):347-403.
- GUO C L, ZHANG B W, ZHENG Y, et al. Granite-type lithium deposits in China: Important characteristics, metallogenic conditions, and genetic mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2024, 40(2):347-403.
- [33] S B Castor, C D. Henry, Lithium-rich claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: Geologic, mineralogical, and geochemical characteristics and possible origin[J]. *Minerals* 10, 68 (2020).
- [34] 刘舒飞, 陈德稳, 李会谦. 中国锂资源产业现状及对策建议[J]. *资源与产业*, 2016, 18(2):12-15.
- LIU S F, CHEN D W, LI H Q. Situation and suggestions of China's lithium resources and industry[J]. *Resources & Industry*, 2016, 18(2):12-15.
- [35] 郑绵平, 刘喜方, 赵文. 西藏高原盐湖的构造地球化学和生物学研究[J]. *地质学报*, 2007(12):1698-1708.
- ZHENG M P, LIU X F, ZHAO W. Tectonogeochemical and biological aspects of salt lakes on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007(12):1698-1708.
- [36] Woolley A R, Bailey D K. The crucial role of lithospheric structure in the generation and release of carbonatites — geological evidence[M]. *Mineralogical Magazine*, 2012, 259–270. [<http://dx.doi.org/10.1180/minmag.2012.076.2.02>.]
- [37] 王登红, 吴西顺. 21 世纪的能源金属-锂的奥秘[J]. *国土资源科普与文化*, 2017(4):22-27.
- WANG D H, WU X S. The mystery of the energy metal - lithium in the 21st century[J]. *Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources*, 2017(4):22-27.
- [38] 刘雪, 王春连, 刘学龙, 等. 中国锂矿床主要类型特征、分布情况及开发利用现状[J/OL]. *中国地质*, 1-29[2024-02-01].
- LIU X, WANG C L, LIU X L, et al. Characteristics of main types of lithium deposits in China, their distribution and current status of development and utilisation [J/OL]. *Geology in China*, 1-29[2024-02-01].
- [39] Sanjuan B, Gourcerol B, Millot R, et al. Lithium-rich geothermal brines in Europe: An up-date about geochemical characteristics and implications for potential Li resources[J]. *Geothermics*, 101: 102385.

and many other high-tech fields. The world's germanium resources are relatively scarce and unevenly distributed, with nearly 96% of proven germanium reserves concentrated in a few countries such as the United States, China, and Russia. As one of the most important strategic advantageous mineral resources in China, germanium is distributed in 14 provinces (regions) throughout the country. The deposit types are mainly coal seam and carbonate hosted type, and are concentrated in five germanium forming regions (belts), including the Great Xing'an Mountains, the Three Rivers in Southwest China, Sichuan, Yunnan and Guizhou, the middle and lower reaches of the Yangtze River, and the Nanling Mountain. By analyzing the endowment, distribution, and development and utilization of germanium resources at home and abroad, and assessing the consumption situation and supply and demand pattern of the world and China's germanium industry chain, it is proposed to increase the exploration of key germanium mineralization areas (belts) in China, carry out research and development of high-end germanium materials and application technologies, strengthen the optimization and upgrading of the germanium industry structure, and promote the green, healthy, and virtuous cycle development of germanium secondary recycling.

Keywords: Mineral engineering; Germanium; Strategic minerals; Distribution and supply; Industry chain

////////////////////////////////////
(上接第 10 页)

New Progress in Exploration and Development of Global Li-Be-Nb-Ta Resources

WU Xishun¹, WANG Denghong², CHENG Aiyong³, MIAO Miao^{4,5}, YANG Tiantian⁶, YAO Xiang⁷
(1.National Geological Documentation Center, China Geological Survey (China Geological Library), Beijing 100083, China; 2.Key Laboratory of Mineralization and Resource Evaluation, Ministry of Natural Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3.Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China; 4.School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 5.Oil and Gas Resources Survey Center of China Geological Survey, Beijing 100083, China; 6.Beijing Electronic Technology Vocational College, Beijing 100176, China; 7.Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510075, Guangdong, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. Li-Be-Nb-Ta are not only the important highly-demanded rare metals, but also key minerals in emerging strategic industries. They have both commonality and individuality in mineralization mechanism and R&D with new progress. This article aims to comprehensively and accurately measure and evaluate the global resource and reserve data of Li-Be-Nb-Ta, and timely reflect new developments in exploration and development and technological progress. The multi-cycle metallogenic theory of granite pegmatite has made important breakthrough in exploration, the technical output of lithium deposits in South American salt lakes is approaching, the potential for lithium extraction and storage increase in clay rocks and geothermal brines is increasing, the alkaline-peralkaline volcanic intrusive pegmatite type Nb-Ta mineralization has been highlighted in the Americas and the Qinghai-Xizang region, and the exploration of Li-Be deposits in mainland China has made important breakthroughs. The construction of the resource base for Nb-Ta-REE in northwest Hubei can learn from the progress and experience of enterprise level exploration and testing such as Avalon Rare Metals Company in North America. Based on the analysis of 1396 lithium beryllium niobium tantalum deposits and typical cases in the world, this article proposes that multi stage thermal events and multi cycle magmatic differentiation and melting may be the key conditions for large to super large deposits.

Keywords: Mining engineering; Li-Be-Nb-Ta; Metallogenic theory; Exploration and development; Global thermal events; Giant deposits