

王登红,代鸿章,杨岳清等. 2026. 对于锂矿成矿规律的若干认识及其对今后找矿的启示. 岩石学报,42(06): 1955-1966, doi: 10.18654/1000-0569/2026.06.01; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.06.01

对于锂矿成矿规律的若干认识及其对今后找矿的启示^{*}

王登红 代鸿章 杨岳清 秦锦华 诸泽颖 赵晨辉 王成辉 刘善宝 李建康 李鹏
WANG DengHong, DAI HongZhang, YANG YueQing, QIN JinHua, ZHU ZeYing, ZHAO ChenHui, WANG ChengHui, LIU ShanBao, LI JianKang and LI Peng

中国地质科学院矿产资源研究所,自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037
MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
2025-09-18 收稿, 2026-03-08 改回.

Wang DH, Dai HZ, Yang YQ, Qin JH, Zhu ZY, Zhao CH, Wang CH, Liu SB, Li JK and Li P. 2026. Some understandings of the metallogeny of lithium and their implications for future exploration. *Acta Petrologica Sinica*, 42(6): 1955-1966, doi: 10.18654/1000-0569/2026.06.01; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.06.01

Abstract To deepen the metallogeny of the lithium deposits, transcend conventional prospecting paradigms, and support its exploration, this study systematically reviewed domestic and international exploration and research data on different types of lithium deposits. It conducted in-depth analysis and summarized the metallogenic regularities of lithium deposits from five aspects, namely lithium deposit types, metallogenic epochs, tectonic settings, geochemical behavior of lithium, and zonation of pegmatites, and further proposed new insights (directions) for lithium prospecting, from which the following results can be obtained. Firstly, the types of lithium deposits have transcended the traditional framework of brine-type and pegmatite-type. Unconventional types such as sedimentary-type, granite-type, oilfield brine-type, and hot spring-type have demonstrated significant potential. Among these, the Li₂O content in some bauxite claystones stably ranges from 0.1% to 0.5%, indicating significant economic potential. Secondly, the metallogenic epochs of lithium have broken the limitation of “one old and one new” (a traditional perception of limited epochs) and show polycyclic characteristics. In addition to the Late Indosinian-Early Yanshanian periods, which is the main metallogenic epoch for pegmatite-type lithium deposits in China, lithium mineralization also occurred in the Precambrian and Paleozoic. It also includes metallogenic events such as the Late Permian-Early Triassic (for underground brine-type lithium deposits) and Cretaceous (for paleo-brine-type lithium deposits) ones. Thirdly, the distribution of lithium mineralization is not restricted to a single tectonic unit. The West Kunlun-Songpan-Ganzi and Himalayan orogenic belts are core metallogenic belts. However, the sparse development of pegmatite-type lithium deposits in the North China and Tarim Platform areas may be related to long-term “destruction” (geological processes like erosion or tectonic disruption). Fourthly, the unique geochemical properties of Li⁺ dominate its migration and enrichment during the mineralization process. Li⁺ tends to disperse in Mg-rich environments, while it is prone to high enrichment in aluminum-rich oxidizing environments. Moreover, the formation of brine-type lithium deposits is often closely associated with volcanic-hydrothermal activities. Fifthly, the zonation of pegmatites is manifested at two scales: single dike and ore field. At the ore field scale, horizontal zonation appears around the parent rock mass; within a single dike, vertical or horizontal zonation combinations of minerals and elements may form. Based on the above-mentioned regularities, the following prospecting insights (directions) are put forward: (1) The hornfelsed zones and strata with developed andalusite and cordierite can serve as prospecting indicators for pegmatite-type lithium deposits, while skarns are unfavorable for mineralization due to the magnesium-induced dispersion effect. (2) More attention should be paid on distinguishing magmatic-origin “alkali-feldspar granite-type” rare metal deposits from hydrothermal-origin “porphyry-type” ones. (3) The wall rocks of large to super-large lithium deposits are generally basic rocks, and lithium in alkaline basic rocks may be abnormally enriched, i. e., this has important implications for prospecting. Furthermore, based on the phenomenon of lithium enrichment in hot springs, the relationship between basalt and lithium deserves further research. In conclusion, lithium prospecting needs to break

^{*} 本文受国家重点研发计划项目(2021YFC2901900、2021YFC2901905)和中国地质调查局项目(DD20230034、DD20230055、DD20221695、DD20190379、DD20160346)联合资助。
第一作者简介: 王登红,男,1967年生,博士,研究员,从事矿产资源研究,E-mail: wangdenghong@vip.sina.com

through the constraints of traditional deposit types, epochs, and tectonics. We should combine geochemical cycles with integrated technical methods to expand exploration into “new strata and new types”. This study not only expands the theoretical system of lithium deposit types and their spatio-temporal distribution but also provides solid support for establishing a prospecting model of “mineral indicators + ore-hosting wall rocks + metallogenic parent rocks + technical prediction”. It is of significant guiding importance for the layout of lithium resource exploration and resource security assurance in China.

Key words Lithium; Metallogenic regularity; Prospecting insight; New type; Exploration layout

摘 要 本文通过系统梳理国内外不同类型锂矿勘查及研究资料,以锂矿类型、成矿时代、构造背景、锂元素地球化学行为及伟晶岩分带性为重点剖析了锂矿成矿规律,提出了新的找矿建议。研究表明:(1)锂矿类型不局限于卤水型与伟晶岩型,沉积型、花岗岩型、油田卤水型及热泉型等非常规类型也展现出显著潜力,其中部分铝土矿黏土岩的 Li_2O 含量稳定在 0.1% ~ 0.5%,具有潜在开发价值。油田卤水也是非常重要的;(2)锂的成矿时代不局限于“一老一新”而是具有多旋回性,除印支晚期-燕山早期为我国伟晶岩型锂矿主要成矿期外,还有前寒武纪和古生代锂矿,还包括晚二叠世-早三叠世的地下卤水型与白垩纪古卤水型等成矿事件;(3)成矿分布不受单一构造单元约束,西昆仑-松潘-甘孜和喜马拉雅造山带为核心成矿区,而华北、塔里木克拉通的伟晶岩型锂矿发育稀少可能跟长期“破坏”有关;(4) Li^+ 的特殊地球化学性质主导其在成矿过程中的迁移与富集,在富镁环境中易被分散,在富铝氧化环境中易高度富集,且卤水型锂矿的形成常与火山-热液活动密切相关;(5)伟晶岩分带性在单脉与矿田两个尺度均有体现,矿田尺度上呈现围绕母岩体的立体分带,单脉内部则可能形成矿物-元素的垂直或水平分带。基于上述规律认为:(1)角岩化带及红柱石、堇青石发育层系可作为伟晶岩型锂矿找矿标志,矽卡岩因镁分散作用不利成矿;(2)重视区分岩浆成因“碱长花岗岩型”与热液成因“斑岩型”稀有金属矿床;(3)大型-超大型锂矿的围岩可以是基性岩,碱性基性岩中的锂可能超常富集,这对于找矿具有重要的指示意义。另外,基于热泉中锂的富集现象,有关玄武岩与锂的关系值得进一步研究。综上所述,锂矿找矿需突破传统类型、时代和构造的约束,结合地球化学循环与多技术方法,拓展“新层系、新类型”,为建立“矿物标志+容矿围岩+成矿母岩+技术预测”的找矿模式提供了坚实支撑,这对我国锂资源勘查布局与资源安全保障具有重要指导意义。

关键词 锂; 成矿规律; 找矿启示; 新类型; 勘查布局

中图法分类号 P612; P618.71

近年来在我国新疆、四川、江西、湖南等地连续取得锂矿的找矿新进展,但一方面仍然难以满足战略性新兴产业快速发展的需要,进口量仍然超过一半;另一方面也还有不少理论与找矿实践乃至开发利用的难题如油田卤水中锂的资源潜力与利用问题尚待解决;再一方面,以美国为首的西方国家加紧加大了对非洲刚果(金)等地 Manono 等超大型锂矿的资源争夺,锂矿业发展的形势依然严峻。本文基于对近年来锂矿成矿理论与找矿实践遇到的现实问题的思考,提出了一些粗浅认识,抛砖引玉,期待锂矿理论研究更上一层楼,锂矿找矿取得更大进展。

1 锂矿的类型不局限于卤水型和伟晶岩型

锂资源的类型,无论是国内还是国外,毫无疑问以卤水型和伟晶岩型占绝对优势。据统计,全球 2022 年锂矿储量 9535 万 t 碳酸锂当量,中国仅次于澳大利亚而列第二;全球锂矿资源量 56345 万 t 碳酸锂当量,以阿根廷最多(江思宏等,2024)。对于卤水型和伟晶岩型锂矿的资源概况、地质特征及其重要性,近年来文献资料非常多,此不赘述。需要注意的是,一些“非常规”的锂矿资源近年来也取得了找矿进展,有的资源储量还很大,但面对巨大的市场变化,如何科学合理地评价非常规锂矿资源,却一直存在争议,即便是卤水型锂矿与伟晶岩型锂矿之间也因为开发利用成本上的显著

差异而影响到产业布局。卤水型锂矿包括地表和地下两种基本类型,地表卤水也称为盐湖型卤水,如我国西藏的扎布耶盐湖;地下卤水则需要把地下的卤水抽到地表来蒸发才能结晶出碳酸锂,如四川盆地、江汉盆地等赋存于地下的卤水。卤水型锂矿在全球的分布很不均衡,在国外以玻利维亚、智利、阿根廷三国交界处最为集中,构成著名的南美“锂三角”。这里由新生代安第斯构造运动形成的盐湖,蕴藏了全球 60% 的锂资源,且生产成本低,一直为世人瞩目(郑绵平等,2023)。在中国,卤水型锂矿以青海和西藏最为重要,新疆西昆仑也有苦水湖等卤水型锂矿,而新疆若羌罗布泊卤水型伴生锂已经得到了回收利用。无疑,卤水型锂矿的形成并不是第四纪成矿作用的独有产物,实际上在古老的地质时代中肯定也有形成。墨西哥的沉积型锂矿可能就是这种类型,索诺拉矿区位于墨西哥西部的索诺拉沙漠,锂主要富集在几个水平层状的粘土层中,平均厚度 20 ~ 40m,地表露头延伸超过 6km。以 0.1% 为边界品位,锂矿石资源量 $26800 \times 10^4 \text{t}$,平均品位 0.27%,约合 $375.40 \times 10^4 \text{t}$ 碳酸锂(Bacanora Lithium Ltd., 2018^①)。盐湖卤水型锂矿由于其直观性,容易被发现、也容易被调查,资源家底容易被摸清,但地下卤水型锂矿资源的寻找、评价与勘探并非易事。1966 ~ 1986 年,我国江汉石油管理局勘探开发研究院在开展石油勘探工作时对含

① Bacanora Lithium Ltd. 2018. Sonora Lithium/Bacanora Lithium

锂卤水也进行了评价,查明伴生锂 2S22 + 333 类资源量达 $308 \times 10^4 \text{ t}$ (《中国矿产地志·湖北卷》编委会,2023)。江汉盆地近年来通过中国地质调查局的项目又有新发现。此外,在江西泰和县还发现了梅岗卤水型锂矿,产于白垩纪地层中,位于江西第二大中新世代盆地——吉泰盆地的东侧,其饱和卤水中富含锂(王焕等,2023)。油田卤水中的锂,在美国、法国、加拿大等国家均不同程度地回收,其中,美国各州油(气)田水中的锂含量地域差异大(变化范围为 $1.60 \sim 692 \text{ mg/L}$)。油(气)田水中的锂资源相当可观(中国地质矿产信息研究院,1996),据估计,美国得克萨斯州 Smackover 组中油田卤水约含有 $75 \times 10^4 \text{ t}$ 的锂资源(Collins,1976),我国则缺乏这方面的资料。埋藏于地下的盆地卤水型锂矿(包括油田卤水)、富集在火山灰等沉积岩中的固化锂矿及地表卤水型锂矿,相互之间存在成因联系,包括锂的物质循环,可以与不同的矿种构成矿床成矿系列,因而可以互为找矿标志。随着社会经济的发展,对锂的需求量不断扩大。除了卤水型和伟晶岩型锂矿外,以往一些不具有开采价值的锂资源也受到了重视。云英岩型虽然典型产地不多,且以含锂的云母为主,但可能同时共伴生有钨锡等矿产资源,而且易采易选,可以一并开发利用,如江西淘锡坑、石雷等钨矿及广西栗木、珊瑚钨锡矿等地均存在局部富集的锂云母(王成辉等,2018,2019,2022)。

花岗岩型锂矿,主要指具有花岗结构的岩浆成因的硬岩型锂矿,往往具有低品位、大吨位的特点。在赣西宜丰、奉新一带少量细晶岩型含锂瓷石矿中富含锂($\text{Li}_2\text{O} = 1.40\% \sim 1.90\%$),锂资源量颇大。江西宜春一带的“含锂瓷石”在 2022 ~ 2024 年间进行过大规模的勘探评价,提交的氧化锂总资源量超过 1000 万 t(陈祥云等,2023)。在内蒙古维拉斯托,截至 2024 年,该矿床查明资源量: Li_2O 量 $245.59 \times 10^4 \text{ t}$,平均品位 0.55%;Sn 金属量 $14.88 \times 10^4 \text{ t}$,平均品位 0.91%;Zn 金属量 $2.84 \times 10^4 \text{ t}$,平均品位 3.05%; WO_3 量 $1.79 \times 10^4 \text{ t}$,平均品位 0.27%(王可祥等,2024)。

近年来另外一种备受关注的锂矿就是沉积型锂矿,也往往被称为“黏土型锂矿”。需要注意的是,铝土矿分布区的含锂黏土,几乎没有进行过科学的评价,也缺乏相应的评价指标。贵州大竹园铝土矿区铝土岩含 Li 平均 0.10%,高于铝土矿(含 Li 0.07%),也高于黏土岩(含 Li 0.05%),而且铝土岩中 Li 的含量分布比较均匀,变化范围小,易于综合利用(王登红等,2013)。在新一轮找矿突破战略行动中,除了注意寻找“煤下铝”之外,也应注意对黏土型锂矿的寻找与综合评价。

2 锂矿的成矿时代不局限于“一老一新”

鉴于锂矿以往认为主要是卤水型和伟晶岩型,而卤水型锂矿主要形成于新生代的第四纪或者说当今(因为大部分的卤水型锂矿目前仍处于成矿过程之中),伟晶岩型锂矿主要

形成于前寒武纪,因此也被称为“一老一新”。这在国内外都是比较典型的,只是国内罕见前寒武纪形成的伟晶岩型锂矿而以中生代尤其是印支期向燕山期过渡-转折时期形成的伟晶岩型锂矿最为引人注目。这方面的研究成果很多,此不赘述,只是强调对于多旋回构造演化比较复杂的中国来说,锂矿不局限于前寒武纪的硬岩型锂矿和第四纪的卤水型锂矿。其中,国内前寒武纪伟晶岩型锂矿床,目前仅有山东省新泰市雁翎关 LCT 型伟晶岩一例报道,成矿于 2609 ~ 2501 Ma(李鹏等,2024)。西昆仑-松潘-甘孜成矿带上的伟晶岩型锂矿主要形成于印支晚期到燕山早期,但也不排除加里东期、海西期及燕山晚期的可能性,而卤水型锂矿(主要指地下卤水型锂矿)在四川盆地有可能在晚二叠世-早三叠世就开始形成了(当时的含锂绿豆岩通过水岩反应完全有可能形成含锂卤水)。鉴于绿豆岩在四川盆地及其周边地区分布广泛,火山凝灰岩的喷发时代具有区域一致性(如贵州新民石门坎一带三叠系关岭组底部的锆石年龄 $246.9 \pm 1.1 \text{ Ma}$ (柴珺等,2022),与重庆铜梁一带的绿豆岩中锆石年龄 $245.86 \pm 0.98 \text{ Ma}$ (孙艳等,2017))几乎一致,意味着除了在四川境内,在重庆铜梁、乃至于贵州新民等地也具有寻找古卤水型锂矿的可能性。在江西的吉泰盆地,含锂卤水赋存在白垩系周田组的构造破碎带和砂岩储层中,也有可能白垩纪就形成了。查明中国东部白垩纪火山盆地中含锂凝灰岩的区域分布情况,对于寻找此类锂矿具有重要意义。当然也不排除中国西部新生代火山盆地(如云南腾冲一带)中存在卤水型锂矿的可能性。欧洲塞尔维亚的贾达尔盆地(中新世)、北美洲墨西哥的索诺拉盆地(渐新世-中新世流纹质凝灰岩等)、美国内华达的麦克德米特(中新世)和克莱顿谷(晚中新世-早上新世)都是新生代火山盆地含锂的典型。

3 锂矿的成矿单元不局限于特定的构造单元

从板块构造理论来看,锂矿的形成与特定的板块边界过程及陆内动力学背景密切相关。稳定的克拉通(如北美、澳洲克拉通)内部因其古老刚性基底,有利于伟晶岩的就位与保存,故而常见伟晶岩型锂矿。相比之下,我国的华北、塔里木克拉通因在中-新生代经历了强烈的构造活化与岩石圈减薄,其稳定性和保存条件较差,导致伟晶岩型锂矿发育稀少;除了洋中脊、大洋盆地没有形成锂矿之外,大陆背景下的盆地和造山带是卤水型锂矿和伟晶岩型锂矿的主要成矿场所,但不排斥洋壳俯冲到陆壳之下的构造背景,更不排除大陆与大陆对接构造背景下的陆内造山带,如青藏高原喜马拉雅成矿带中形成于 25 Ma 前后的伟晶岩型锂矿,已经构成了一条新的锂矿带,包括琼嘉岗锂矿及洛扎县的嘎波锂矿(秦克章等,2021;李光明等,2022)。由于海水中锂的含量很低,而锂又容易分散到白云岩等含镁矿物较多的沉积岩中,因此,大洋环境很难有锂的超常富集。对于大陆及其周边海洋环

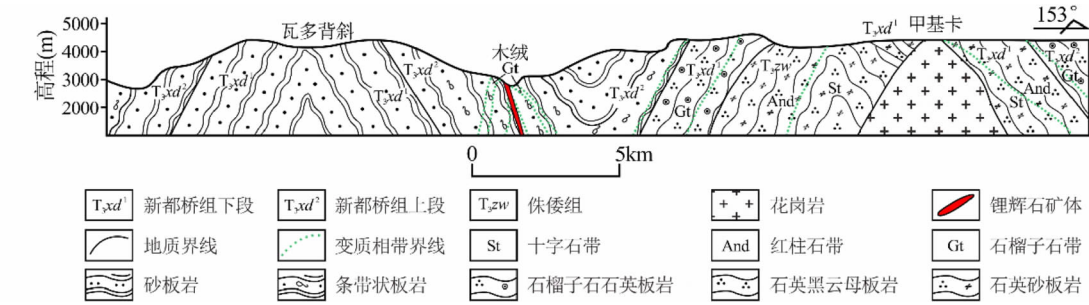


图 1 四川木绒-甲基卡超大型锂矿的区域地质剖面图(据岳大斌等,2025)

Fig. 1 Regional geological profile of the Murong-Jiajika super-large lithium mine in Sichuan Province (modified after Yue *et al.*, 2025)

境,锂也更多地趋向于在富含泥质沉积物的富铝质沉积环境中聚集。

从世界范围看,锂矿的成矿构造环境较为独特而清晰,但不同国家的锂矿随着大地构造背景的不同而不同。我国有其特定的大地构造演化历史,多旋回造山带的发育是我国的一大特色。从目前我国大地构造特征看,在古老克拉通基础上发育起来的造山带,目前找锂矿的条件不是很理想,而西部的古特提斯造山带和新生代造山带,却不断取得找矿突破;从全球范围看,我国的西昆仑-松潘-甘孜锂矿带和喜马拉雅锂矿带分别长达 2800km 和 2500km,在世界上也绝无仅有,其成矿作用也有独特性。在西昆仑-松潘-甘孜锂矿带,目前发现的超大型矿床已不止 6 个(甲基卡、大红柳滩、党坝、李家沟、木绒、加达),大型矿床也不止 10 个,这些矿床中的伟晶岩脉并非最多、最大,但普遍呈全脉矿化的特点,锂矿石也并非都呈伟晶状,细束状结构的矿石和花岗岩型矿石占有很大比例(杨岳清等,2020,2023;李建康等,2023)。可以说,无论是青藏高原北部的西昆仑-松潘-甘孜锂矿带还是中部的喜马拉雅锂矿带,抑或是阿尔金锂矿带、阿尔泰锂矿带、秦岭锂矿带、武夷山锂矿带,穹隆构造对于伟晶岩型锂矿的形成意义重大,但对具体矿床来说,并非每个伟晶岩型锂矿都出现在穹隆构造的核部或近邻。四川的木绒锂矿就出现在两个穹隆之间的过渡部位(图 1)。而川西的长枪、藏南的雅拉香波等穹隆,一直没找到锂矿。因此,穹隆构造有助于锂矿的形成与保存,但也不是所有的伟晶岩型锂矿都产于穹隆构造中。

卤水型锂矿也主要分布在造山带或者造山带两侧的盆地中。卤水型锂矿是锂资源的主要来源,世界上最主要的卤水型锂矿分布在南美的“锂三角”。中国的卤水型锂矿主要分布在青海的柴达木盆地和西藏的内陆湖盆。西藏的含锂卤水型盆地主要形成于第四纪,或者说当前还在成矿,而成矿物质的来源除了周围蚀源区的地表补给之外,火山物质和地下热泉的补给至关重要,如当雄错是青藏高原最有代表性的富锂盐湖,以中地壳部分熔融体为初始来源的南部水系是当雄错盐湖卤水中 Li、Rb、Cs 的主要补给源,分别占其总

来源的 94.70%、96.30%、88.10%(郑绵平等,2023;李胜群等,2025)。柴达木盆地探明的锂资源位居全国第一。四川西部茶洛热泉中锂的含量和云南腾冲著名的大滚锅热水中,锂的含量分别高达 2.13mg/L 和 7.76mg/L,不难推测锂在地壳中的迁移富集与新生代火山活动密切相关(于飒等,2022;王登红等,2023)。即便是在中国中、东部地区,四川盆地、江汉盆地、鄂尔多斯盆地、樟树盆地、周田盆地等,只要出现含锂卤水,在盆地中或多或少存在火山喷发的记录——火山凝灰岩,以四川盆地的“绿豆岩”最为典型,不但层位多,而且累计厚度大,分布范围广,其本身锂含量就高(孙艳等,2017)。绿豆岩形成于三叠纪,其中的锂在 2 亿多年的漫长历史过程中,通过水岩反应,被逐渐转移到卤水中而在适当的储卤构造中聚集成藏(王登红等,2023)。与四川盆地相对,鄂尔多斯盆地尽管其形成演化的历史更加悠久,但卤水型锂矿的信息很少,油田卤水中锂的信息也罕见。这可能跟鄂尔多斯盆地中缺乏含锂火山活动有关,既没有盆地内部含锂火山灰的沉积,盆地周边也缺乏含锂岩浆岩或含锂地层的锂源补充。可以推断,卤水型锂矿,无论是国外还是国内,无论是现代还是中生代之前,或多或少与火山作用有关。也就是说,在增厚地壳背景下的火山活动有利于热水型锂矿的形成。

4 锂的地球化学行为对于锂的区域性物质循环具有重要意义

锂是自然界中原子量最小的金属元素,在元素周期表中排第一列,且只有一个电子而容易失去,成为一价阳离子。这一本质属性又决定了其地球化学行为的独特性。Li⁺的离子半径(0.68Å)与 Mg²⁺的离子半径(0.66Å)非常接近,因而 Li 在镁质沉积岩中分散(高 Mg/Li 值的卤水型锂矿,难以提纯锂,原因也在此)。前述陆相湖盆中当有流纹质火山物质喷发时,含锂的火山灰通过水岩反应可以形成含锂卤水,但当盆地中含 Mg 时,Li 进入含 Mg 矿物晶格而不利锂的成矿。因此,在海泡石、膨润土、蒙脱石等含镁矿物发育的矿区,含锂卤水即便存在,也不容易保存到现代。Li⁺又可以与

Al^{3+} 一起取代 Si^{4+} 而在硅酸盐矿物晶格中占位,因而常常在铝土矿区的黏土岩层中富集, Li_2O 可达到 0.10% ~ 0.50% 甚至更高的含量,如山西平陆曹川黑灰色粘土岩含氧化锂 1.67% ~ 1.68%,黑色铝土岩含氧化锂 1.91% ~ 1.92% (陈平和柴东浩,1997),接近甚至于超过了伟晶岩型锂矿中的平均氧化锂含量。可以说,锂的区域性富集与锂的区域地球化学特征是密切相关的。这跟别的金属元素,尤其是变价元素明显不同。如铁矿可以形成于还原环境,也可以富集于氧化环境,而锂与其他碱金属一样只能在氧化环境中聚集成矿,含锂矿物也是含氧矿物,无论是锂辉石、锂云母、透锂长石、磷锂铝石及含锂的绿泥石、蒙脱石、高岭石等,莫不如此。

在冀东唐山丰润中元古界蔚县群雾迷山组中发现了 Li 含量达 781×10^{-6} (折合 Li_2O 含量 0.16%) 的富锂白云岩,其厚度大、分布广(孙艳等,2023)。其中的锂从何而来? 有没有可能是太古代含锂地质体风化残留的? 为什么中国的克拉通地区罕见伟晶岩型锂矿,曾经存在过的伟晶岩型锂矿是不是随着克拉通的破坏也被破坏了呢? 在山东,新生代的石膏矿产十分丰富,其中泰安大汶口、枣庄底阁的石膏矿属于陆相蒸发沉积型。大汶口盆地石膏、石盐、钾盐、自然硫 4 种矿产共生,石膏矿达到超大型规模,石盐和自然硫矿达到大型规模,钾盐为中型。大汶口盆地的古近纪大汶口组厚度可达 2000 多米,石膏矿赋存于大汶口组中段。虽然大汶口盆地邻近地区存在古老的含锂辉石伟晶岩(2609 ~ 2501 Ma,李鹏等,2024)。太古代锂矿是否为大汶口盆地提供了锂的来源,目前尚不可知,但大汶口盆地富含自然硫,硫的存在可能不利于锂的富集。在江西,位于中北部的樟树盆地,探明有 100 多亿吨岩盐,共有岩盐矿层 54 层,累计厚度 194.93 m,但锂含量很低;而位于武夷山西侧的周田盆地、位于井冈山东侧的吉泰盆地,则是含锂的(《中国矿床发现史·江西卷》编委会,1996;《中国矿产地志·江西卷》编委会,2015)。究其原因,一方面跟是否存在深部来源锂的补给有关(如吉泰盆地就有含锂热泉),另一方面也跟周边是否存在风化剥蚀来源的锂有关。周田盆地东侧就有两个已经剥蚀出来的中型锂辉石矿床——宁都县的河源和广昌县的西港。由于锂辉石很容易风化(变成腐锂辉石等),风化出来的锂进入到附近的卤水盆地。对于樟树清江盆地,虽然其西侧也有大量的含锂岩石,但锂主要赋存在磷锂铝石和锂云母中,不容易风化,且本身的含量也低,即便是有锂从细晶岩或含锂瓷石岩中风化转移出来,对于快速沉降或者沉降幅度巨大的樟树清江盆地来说,也很难聚集成矿。

锂能在地表卤水中形成矿床,反映了锂在表生作用中有超常富集的地球化学特性,其物质来源主要是盐湖附近的中酸性火山岩及其他富锂岩系。火山物质与热水溶液通过水岩反应可以形成非常规的含锂矿物,美国内华达州的 King Valley 和加利福尼亚的 Hector 就属于这种非常规锂矿床,因其含有规模巨大的非常规含锂矿物——锂蒙脱石(锂含量 0.40%) 而受到广泛关注(Rossi,2010^①;Kesler *et al.*,2012)。

由火山灰受热液蚀变而形成的锂蒙脱石赋存在蚀变火山灰的粘土岩中(Sweet,1980)。此外,碎屑沉积岩或火山物质与热水溶液或蒸发卤水之间通过相互作用也可以形成非常规的含锂矿物,如塞尔维亚的 Jadar 矿床(Jadarite 的锂含量可高达 5.70%)。Jadar 锂矿位于湖湘沉积盆地,富集锂的 jadarite 呈细密纹理状,可能是由碎屑沉积物和周围的卤水通过水岩反应而形成的,包括凝灰岩的脱玻作用或粘土矿物的蚀变作用(Obradovic *et al.*,1997;Jones,2007)。我国云南腾冲地区也存在类似的围岩蚀变(郭唯明等,2019;王登红等,2023)。综上所述,锂可以在岩浆岩但主要是结晶分异程度高的二云母花岗岩及其喷出相的流纹质凝灰岩中富集;锂也可以在沉积岩中富集,但主要富集在含镁高或含铝高的沉积环境;花岗岩或流纹岩中的锂风化剥蚀后可以成为卤水型锂矿的物质来源。那么,镁质基性岩或者超基性岩中是否也可能出现锂的“超常富集”呢? 西藏洛扎拉隆和恰隆穹窿滑脱构造中出现 21.90 Ma 的含 Be-Nb-Ta 伟晶岩和 21.90 ~ 23.60 Ma 的花岗岩,也出现 18.02 ~ 18.89 Ma 的变基性岩;变基性岩年龄最小,其 Li 的含量可达 129×10^{-6} (付建刚等,2025),是否意味着幔源岩浆本身就富集 Li 还需要进一步研究。江西吉泰盆地天星岗玄武岩含锂 $19.20 \times 10^{-6} \sim 42.40 \times 10^{-6}$ (罗璐等,2025),有可能是吉泰盆地卤水型锂矿的锂源之一。

有关玄武岩与锂的关系值得进一步研究,且引出了另外一种锂资源——热泉型锂或含锂热泉。按照国标,泉水中 Li 含量达到 0.20 mg/L 即达锂矿泉水的下限,而云南腾冲热泉中 Li 的含量达到了 2.90 mg/L,其中的锂是否跟周边地区的玄武岩有关呢? 就全国各地的新生代玄武岩与热泉分布特征来看,这种可能性是不能排除的(王登红等,2005)。黑龙江、吉林等地的含锂矿泉水分布在五大连池、长白山等地的新生代玄武岩区。一般来说,地幔岩中 Li 含量普遍低于 2×10^{-6} ,而云南腾冲第四纪玄武岩的 Li 含量为 $(1.26 \times 10^{-6} \sim 28.29 \times 10^{-6})$,皇甫岗和姜朝松,2000)。云南洱海东部新生代龙王庙粗面玄武岩和旗鼓山橄榄安粗岩的 Li 含量则分别达 72.83×10^{-6} 与 218.60×10^{-6} (谢应雯等,1999),位于西昆仑-松潘-甘孜成矿带的可可西里新生代粗面岩、安粗岩的 Li 含量达 $23.40 \times 10^{-6} \sim 85.40 \times 10^{-6}$ (邓万明,1998),可见,碱性基性岩中的锂可能超常富集,这对于找矿具有重要的指示意义。

5 伟晶岩型锂矿的分带性及其形成机制

对于伟晶岩与伟晶岩型锂矿的分带性问题,存在 2 个不同的概念:一是同一条矿脉的分带性;二是整个伟晶岩岩田

① Rossi ME. 2010. NI 43-101 Technical Report Stage II (South Lens) Resource Estimate, Kings Valley Project, Orovada, Humboldt County, Nevada, USA. GeoSystems International Inc.

表 1 综合性稀有金属矿床的分带(据邹天人等,1986;邹天人和李庆昌,2006;王登红等,2002 修改)

可可托海 3* 脉					库鲁木特 112* 脉				
分带	矿物组合	矿化	体积(vol%)	分带	矿物组合	矿化	体积(vol%)		
I 文象准文象带	钠长石-石英-云母-电气石-绿柱石	Be	17.68	(1) 钠长石化中粗粒带	石英-微斜长石-锂辉石-绿柱石-钨钼铁矿-白云母-锰铝榴石-氟磷辉石-泡沸矿-锆石电气石	Li-Be-Nb-Ta	7.7		
II 糖粒状钠长石巢状体带	钠长石-石英-绿柱石	Be	15.14	(2) 钠化石英-微斜长石带	石英-微斜长石-钠长石-白云母-锂辉石-钨钼铁矿-绿柱石-锰铝榴石-氟磷辉石-泡沸矿-锆石	Li-Be-Nb-Ta	13		
III 微斜长石块体带	微斜长石-石英		17.94	(3) 石英钠长石锂辉石带	石英-微斜长石-钠长石-白云母-锂辉石-钨钼铁矿-磷辉石-泡沸矿-锆石	Li-Be-Nb-Ta	70		
IV 白云母石英英集体带	白云母-石英-微斜长石-绿柱石-透锂长石	Be-Nb-Ta	20.00	(4) 石英钠长石集合体	石英-微斜长石-钠长石-白云母-钨钼矿物-锰铝-钙铝榴石-氟磷灰石-泡沸矿-偏磷酸矿	Nb-Ta-Bi	0.2		
V 叶钠长石锂辉石带	叶钠长石-锂辉石-钨钼铁矿-石英-磷锂铝石	Li-Nb-Ta	1477	(5) 细粒钠长石带	钠长石-白云母-石英-微斜长石-绿柱石		0.1		
VI 石英锂辉石带	石英-锂辉石-叶钠长石-钨钼铁矿-磷锂铝石	Li-Nb-Ta	8.74	(6) 石英白云母集合体	石英-钠长石-白云母-锂辉石-钨钼矿-钨钼矿-细晶石-富铈锆石	Nb-Ta-U-Hf	7		
VII 薄片状钠长石带	白云母-钠长石	Ta-Cs	3.27						
VIII 锂云母带	钠长石-锂云母-电气石	Ta-Li-Rb-Cs	0.08						
IX 微斜长石石英英集体带	石英-钨榴石-锂云母-钠长石	Cs	0.02						
X 石英-微斜长石核	石英-微斜长石	Rb-Cs	2.38						

(或矿区)的分带性。这是 2 个完全不同的概念:对于同一条伟晶岩脉来说,可以按照岩浆-(热液)结晶分异的理论,分别从矿物、元素、结构构造、温度、压力等不同的角度来进行划分,甚至根据同一种矿物的不同亚类来进行划分。研究得最深入者无疑是新疆的可可托海三号脉,其矿物学分带、元素分带都很复杂,但前人也给出了“完美”的分带;其次是柯鲁木特 112 号脉(表 1)。但是这样的分带性在四川的甲基卡新三号脉就没有出现,甚至既没有明显的矿物组合分带、元素分带,也很难区分结构构造带。同样,川西的党坝、李家沟、木绒乃至新探明的加达等百万吨级别的伟晶岩型锂矿,均没有出现新疆可可托海三号脉这样的复杂分带性。甲基卡矿田分带性比较好的是 134 号脉,但也只能分出细粒钠长石带(深部)、细粒钠长石(微晶)锂辉石带和细粒钠长石锂辉石带,钠长石在各个带实际上主要是细粒状的,并非如可可托海三号脉那样呈粗晶的“叶片状”。近年来新发现的甲基卡新三号脉也如此。因此,单一伟晶岩脉的“完美”分带是否具有普遍性,尚难下结论。在四川甲基卡矿区,整个伟晶岩岩田呈现出一种矿田或者岩田尺度的区域分带性,即围绕花岗岩岩株(也被认为是伟晶岩的母岩),自内向外由二云母花岗岩→微斜长石伟晶岩带→微斜长石钠长石伟晶岩带→钠长石伟晶岩带→锂辉石伟晶岩带→锂(白)云母伟晶岩带→石英脉带,出现分带性(图 2)。这种区域分带性与矿脉的分带性可能形成复杂的组合关系,因为距离母岩体不同的水平空间位置可能随着剥蚀程度的不同而出现不同的伟晶岩脉类型,而每一条伟晶岩脉本身也是可以发生垂直分带的。因此,对于地质找矿工作来说,尤其是布设钻孔的时候,既要考虑到伟晶岩脉群体的水平分带,也要考虑到单一伟晶岩脉脉体的垂直分带(而此时单一脉体的水平分带不那么关键)。

6 对找矿的几点启示

6.1 为什么锂在矽卡岩中罕见聚集成矿而角岩中常见

矽卡岩型锂矿,在国内外罕见报道,但不是没有。在中国湖南的香花岭也出现香花石、锂铍石、羟硅铍石等含锂的稀有金属矿物,这些矿物主要是在岩浆热液与碳酸盐岩围岩发生接触交代的环境中形成的。但正是由于围岩中富含 Mg 而可能导致锂被分散,且这种分散不局限于岩浆热液阶段。在含锂岩浆侵入到地层的过程中,岩浆要消耗掉一部分的地层物质,而地层中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等二价离子进入到岩浆中,岩浆中的 Si、Al 及 Li 进入到围岩中。这种“双交代作用”不局限于岩浆作用的晚期阶段,在早期阶段也同样不可避免地发生。因此,只要围岩中存在碳酸盐岩,矽卡岩中锂的聚集成矿现象就罕见。反之,角岩中发生锂的聚集成矿现象就比较常见,哪怕是发生角岩化的围岩属于基性岩浆岩时也可能出现锂的富集,如新疆可可托海三号脉(栾世伟等,1995)。在四川的甲基卡矿区,利用泥质岩热变质之后形成堇青石、

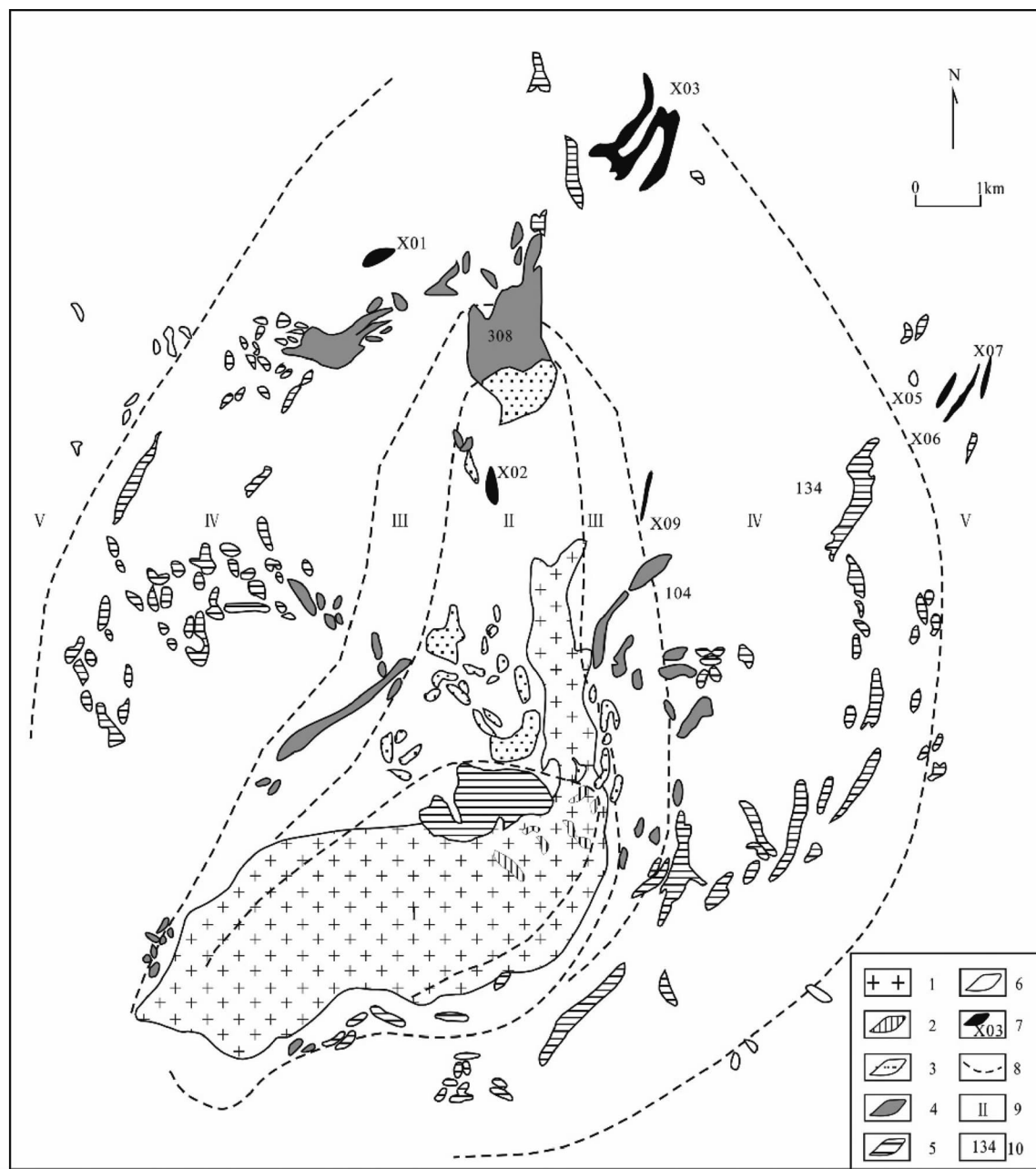


图2 四川甲基卡伟晶岩岩田(稀有金属矿田)中伟晶岩脉群的水平分带(地质科学研究院地质矿产所稀有组,1975)

1-花岗岩;2-微斜长石伟晶岩;3-微斜长石钠长石伟晶岩;4-钠长石锂辉石伟晶岩;5-锂辉石伟晶岩;6-锂云母伟晶岩;7-新发现矿脉及编号;8-伟晶岩脉带之大致分界线;9-伟晶岩脉带编号;10-伟晶岩脉编号; I -微斜长石伟晶岩带; II -微斜长石-钠长石伟晶岩带; III -钠长石伟晶岩带; IV -锂辉石伟晶岩带; V -锂云母-白云母伟晶岩带

Fig.2 Horizontal zonation of pegmatite dykes in the pegmatite field (rare metal ore field) of Jiajika, Sichuan Province (Rare Group, Institute of Geology and Mining, Academy of Geological Sciences, 1975)

1-Granite; 2-Microcline pegmatite; 3-Microcline-albite pegmatite; 4-Albite-spodumene pegmatite; 5-Spodumene pegmatite; 6-Lepidolite pegmatite; 7-Newly discovered ore vein and its number; 8-Approximate boundary of pegmatite zone; 9-Pegmatite zone number; 10-Pegmatite vein number; I -Microcline pegmatite zone; II -Microcline-albite pegmatite zone; III -Albite pegmatite zone; IV -Spodumene pegmatite zone; V -Lepidolite-muscovite pegmatite zone

红柱石、十字石等角岩化带的普遍现象来指导找矿,取得了十分显著的成效。甲基卡矿田的围岩变质带一般可分为:透辉石带(岩体顶部或接触带)→十字石带→十字石红柱石带

→红柱石带→黑云母带。需要注意的是,这种看似很有规律的分带性对于大型超大型矿床来说,可能由于成矿作用的复杂性、岩浆活动的多期多阶段性而难以“对号入座”。仅以甲

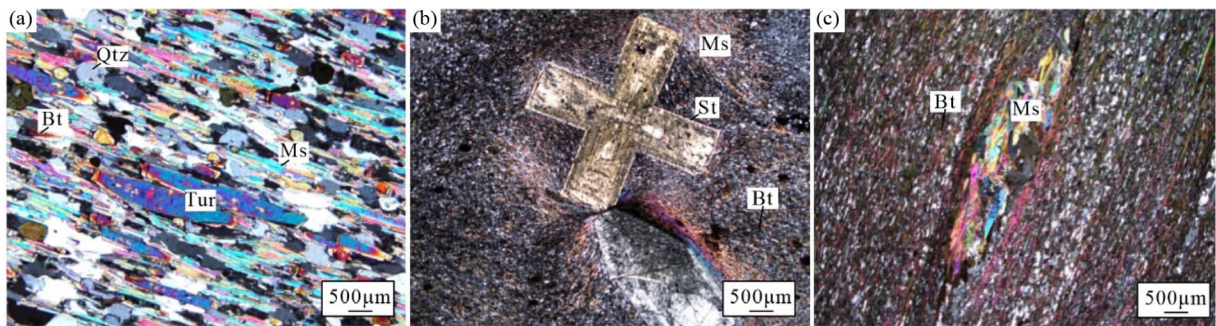


图3 四川甲基卡矿区新三号脉 ZK1101 钻孔揭示的顶板、底板围岩(侏倭组)显微镜下特征

深度分别为 69.70m、110.50m 和 126.40m。(a)电气石-二云母片岩;(b)十字石片岩;(c)二云母片岩,云母呈“云母鱼”。Bt-黑云母;Qtz-石英;Ms-白云母;Tur-电气石;St-十字石

Fig. 3 Microscopic characteristics of the surrounding rocks of the roof and floor (Jurassic Formation) revealed by the ZK1101 borehole of the New No. 3 vein in the Jiajika mining area, Sichuan Province

The depths are 69.70m, 110.50m and 126.40m respectively. (a) Tourmaline two-mica schist; (b) Staurolite schist; (c) Two-mica schist, mica showing “mica fish” texture. Bt-biotite; Qtz-quartz; Ms-muscovite Tur-tourmaline; St-staurolite

基卡新三号脉 ZK1101 钻孔揭示的情况看,不同深度的云母出现不同的状态(图3),其 Li 的含量也不同,说明含锂伟晶岩在成岩成矿过程中既产生热变质效应,也存在 Li 的扩散现象。据此也可以作为预测深部隐伏矿脉的依据。对于古老变质岩区的围岩,既要区分区域变质形成的变质岩,又要区分由于岩浆岩侵入而造成的热接触变质岩——角岩。推而广之,利用堇青石、红柱石、十字石作为矿物学标志,以角岩作为容矿围岩,以本身就富含锂的二云母花岗岩(淡色花岗岩)作为成矿母岩,利用大数据、人工智能预测的新技术新方法,可以构建起伟晶岩型锂矿的找矿技术方法新体系。当然,不是所有的伟晶岩型锂矿都具备上述特征。

在川西甲基卡和可尔因矿田中,由于二云母花岗岩等岩体的侵入,在其周围一定范围的上三叠统地层中产生了接触变质和热液蚀变,但围岩不同,蚀变作用有差异。在含碳酸盐矿物和砂质成分较多的侏倭组和杂谷脑组,主要是矽卡岩化,但矽卡岩的特征并不是很典型,靠近脉体主要发育透辉石,远离接触带,发育石榴石和角闪石,再远则是黑云母。近伟晶岩接触带其上叠加有含锂的黑磷云母和电气石带。总体来看,蚀变带不宽,锂蚀变带不是很有特色。但在甲基卡,由于围岩还存在新都桥组且是主体,其泥质成分较多,因此,热接触变质作用形成十字石-红柱石-黑云母带,蚀变带宽度较大,达数百米至上千米,含锂伟晶岩脉主要发育在十字石-红柱石带中。在含锂伟晶岩侵入后,又在该蚀变带的基础上,叠加发育了电气石-堇青石化带,其宽度可达 20 余米,锂的含量明显偏高,是寻找锂伟晶岩的重要标志。在湖南香花岭,岩体侵入的围岩是碳酸盐岩,蚀变后形成的仍是以碳酸盐质为主体的条纹岩,因此其蚀变矿物较为复杂也更加独特(黄蕴慧等,1988)。

6.2 有没有斑岩型锂矿?

中国近年来在江西、湖南等地取得了硬岩型锂矿的找矿

新进展。其中赣西北九岭南缘宜丰-奉新地区的锂矿与甘坊复式花岗岩体有关;湘南临武鸡脚山超大型蚀变花岗岩型锂矿赋存在通天庙岩体中,而通天庙岩体与尖峰岭、癞子岭等燕山晚期黑云母花岗岩岩株一起赋存于香花岭穹隆构造,推测深部存在较大岩基(王登红等,2022)。此类锂矿的直接矿石既不是矽卡岩也不是伟晶岩,而直接就是岩体本身。实际上,四川甲基卡马颈子岩体本身也含锂,只是其含量远不如伟晶岩而没有当作“矿体”来评价。随着 2017 年市场上锂价的飙升,原先没有经济效益的“含锂瓷石”也具有了从中提取锂的经济可能性,因此,江西省通过“大会战”的方式探明了圳口里、金子峰-左家里、石家里(东段)、石家里(西段)和茅岭 5 处超大型及水南和港口两处大型锂矿,两轮整装勘查新增 Li_2O 总资源量高达 $920.75 \times 10^4 \text{t}$ (陈祥云等,2023),这对于摸清锂资源家底,降低市场价格等具有一定的现实意义。单就矿石类型本身来说,此类“大吨位、低品位”的锂矿石就是岩体本身,具有类似于斑岩型铜矿、斑岩型金矿“低品位、大吨位”的共性特征,但岩石本身往往并非斑岩,斑晶不发育,斑状结构也不突出,某种程度上以往也称为“细晶岩”。比如江西同安一带的“含锂瓷石”,在以往的区域地质调查报告中就定义为“细晶岩型”。为了进一步拓展找矿思路,本文将江西、湖南等地发育的此类含锂达到一定程度的细晶岩型锂矿,与内蒙古维拉斯托等地报道的角砾岩型锂矿,归入到“硬岩型”锂矿的大类中。

在江西宜春的雅山岩体,局部可见透锂长石花岗岩具有似斑状结构(图4),斑晶由透锂长石(5%~10vol%)、钾长石(5%~10vol%)、石英(20%~30vol%)组成,基质为细粒钠长石(40%~50vol%)、锂云母(10%~20vol%)等。钾长石与石英斑晶发育“雪球结构”,斑晶粒径为 2.5~4.0mm,板条状钠长石(粒径 50~200μm)在石英和钾长石斑晶中呈现同心圆状分布。透锂长石在手标本上呈自形-半自形粉红色长

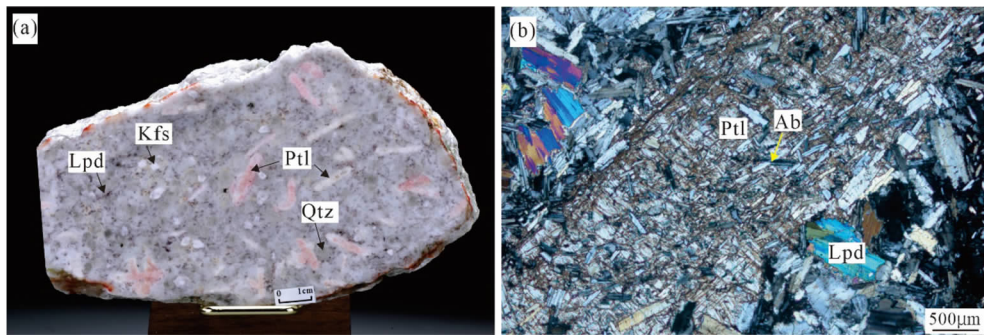


图4 江西宜春雅山岩体中的似斑状透锂长石(粉红色)(a)及其显微镜下特征(b)

样品由诸泽颖提供;透锂长石已经被钠长石交代,实际上已经成为残斑,表明透锂长石本身可能是岩浆成因。Kfs-钾长石;Lpd-锂云母;Ptl-透锂长石;Ab-钠长石

Fig. 4 Porphyritic lepidolite (pink) in Yashan rock mass, Yichun, Jiangxi Province (a) and its microscopic characteristics (b)
The sample was provided by Zhu Zeying. Petalite has been metasomatized by albite and has actually become a remnant, indicating that petalite itself may be of magmatic origin. Kfs-K-feldspar; Lpd-lepidolite; Ptl-petalite; Ab-albite

柱状,粒径约为10~20mm,在正交偏光镜下干涉色为一级橙黄,近平行消光,具有两组完全解理。透锂长石内部镶嵌钠长石(粒径约为200 μm),局部发育他形微粒钾长石(粒径约为50 μm)。根据岩石定名规则,将样品定名为透锂长石钠长石锂云母花岗岩。

实际上,对于是否存在斑岩型锂矿或者是否存在斑岩型稀有金属矿床,一直有不同看法。袁忠信等(1981)早就指出,斑岩型稀有金属矿床是一种重要的稀有金属矿床类型,矿石呈浸染状或细脉浸染状,稀有金属品位不高,但储量大。但陈德潜等(1982)提出了不同的看法,认为袁忠信等(1981)文章中举的例子,仍然属于“花岗岩型”。关于斑岩矿床,也有人把斑晶发育的矿床笼统参照斑岩铜矿床的概念来理解。对斑岩矿床的共识是由超浅成-浅成岩浆作用形成的矿床,晚期热液蚀变发育,但在不同矿种中,成矿特点有差异。斑岩铜矿中成矿作用以晚期细脉浸染状铜矿化发育为特征,但在稀有金属成矿的碱长花岗岩中,石英、碱性长石则呈显著自形的斑晶产出为特征,稀有金属矿物则呈细小的半自形矿物产出在钠长石、云母发育的基质中,在斑晶石英等矿物中几乎都存在钠长石的雪球环带。在华南,不仅是江西的414矿床如此,在湖南、湖北、广东、广西、福建等地也有很多类似矿床。为与以细脉浸染状矿化为特点的斑岩型矿床区别,当斑状结构岩浆岩中的稀有金属矿物属于岩浆成因时,本文以稀有金属碱长花岗岩命名之,当其品位达到工业要求时,称为“碱长花岗岩型稀有金属矿床”;当稀有金属矿物属于岩浆期后热液交代成因且斑岩具明显的“细脉浸染状”矿化特点时,则可称为“斑岩型稀有金属矿床”。

6.3 为什么世界上一些大型超大型锂矿的围岩不是花岗岩而是基性岩

学术界或者勘查界往往把伟晶岩型锂矿称为“花岗伟晶岩型锂矿”,但无论是我国新疆的可可托海三号脉还是阿富

汗的帕斯古斯塔或是澳大利亚的格林布什,伟晶岩型锂矿的直接围岩恰恰不是花岗岩而是辉长岩等基性岩(王登红等,2017)。实际上,“花岗伟晶岩型”指的是伟晶岩本身的化学成分和矿物成分具有花岗岩的特征,此类伟晶岩的主要造岩矿物是长石、石英、云母,与花岗岩的矿物成分完全一致,只是其矿物粒度明显粗大而以“伟晶”名之。那么,花岗伟晶岩是不是一定是花岗质岩浆结晶分异的产物呢?大多数情况可能是,但也不见得全部是,需要具体问题具体分析。有的伟晶岩岩田中并没有花岗岩岩体,有的有岩体,但可能不是同一个时代的。四川甲基卡矿区的马颈子花岗岩体,一般认为是伟晶岩的母岩,但许志琴等(2019)认为马颈子岩体不存在,只是一系列的“岩席”。那么,“岩席”本身与伟晶岩之间又是什么关系,为什么围绕“岩席”可以形成区域性的分带呢?是受到穹窿构造的控制还是岩浆岩结晶分异的制约?这些问题尚待进一步研究。此外,既然有“花岗质的”伟晶岩,那么,有没有“玄武质的”伟晶岩呢?理论上存在,现实中也有,我国陕西南部就有产于斜长岩中的伟晶状金红石矿,金红石矿体与围岩界线清晰,金红石粒度一般1~3cm,最大可达11cm。孙鼎和王德滋(1958)对山东济南辉长岩与伟晶岩的研究堪称典范。一般来说,二氧化硅的含量越高,岩浆的黏度越大,岩浆流动、运移的速度越慢,有利于矿物的结晶;二氧化硅的含量越低,岩浆的黏度就越小,岩浆流动的速度就越快,越不利于矿物的结晶,甚至还没有结晶就固结成霏细岩。基性岩浆SiO₂含量低,因此,基性成分的伟晶岩在世界上是罕见的,基性成分的伟晶岩也不是锂矿的主要找矿对象,而可能是磷灰石、铂族元素矿床等的找矿对象(王登红等,2007),如河北、青海等地可见伟晶状透辉石岩等基性岩跟磷灰石和稀土成矿有关。总体上,含锂伟晶岩的围岩较为复杂。

7 结论

(1) 锂矿以卤水型和伟晶岩型为主,成矿时代以前寒武

纪和第四纪为主,但也不排除其他类型、其他地质时代成矿的重要性。除占主导地位卤水型与伟晶岩型锂矿外,沉积型(如黏土岩型)、花岗岩型、油田卤水型及热泉型等非正规类型均展现出巨大的资源潜力;

(2) 锂主要富集在结晶分异的酸性岩浆岩中,但不排除基性岩尤其是碱性基性岩出现高含量锂的可能性;锂的物质循环主要集中在地壳尤其是硅铝质层中,但地幔中锂的赋存状态与物质循环也值得研究;

(3) 伟晶岩型锂矿的分带性既有单一脉体的分带,也有岩田尺度的立体分带,二者的叠加复合将加大伟晶岩含矿性评价的难度,导致找矿勘探工程布设的复杂性。

References

- Chai J, Jiang DY, Zhou M, Sun ZY, Qi NY, Motani R and Tintori A. 2022. The U-Pb age of zircon in the bottom layers of the Guanling Formation from Shimenkan Section, Xinmin Town, Panzhou, Guizhou, and its significance. *Geological Review*, 68(3): 845-862 (in Chinese with English abstract)
- Chen DQ, Zhao GZ and Zhu ZX. 1982. These rare-metal deposits as "porphyry-type" or "granite-type"? *Geological Review*, 28(5): 478-480 (in Chinese)
- Chen P and Chai DH. 1997. *Sedimentary Geochemistry of Carboniferous Bauxite Deposit in Shanxi Massif*. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Publishing House, 1-267 (in Chinese)
- Chen XY, Wu JH, Tang WX, Xie CH, Gong M, Wang GH, Zhou XG, Gao Y, Zhou XJ, Deng MC, Li YJ, Nie XL, Lai CJ, Zhang FS, Li RZ, Zhang JQ and Wei JH. 2023. Newly found giant granite-associated lithium resources in the western Jiangxi Province, South China. *Earth Science*, 48(10): 3957-3960 (in Chinese with English abstract)
- China Institute of Geology and Mineral Resources. 1996. *Foreign Mineral Resources*. Beijing: Seismological Press, 219-223 (in Chinese)
- Collins AG. 1976. Lithium abundance in oilfield waters. U. S. Geological Survey Professional Paper, 1005: 116-123
- Deng WM. 1998. *Cenozoic Intraplate Volcanic Rocks in the Northern Qinghai-Xizang Plateau*. Beijing: Geological Publishing House, 1-179 (in Chinese)
- Editorial Committee of Geology of Mineral Deposits of China · Hubei Volume. 2023. *Geology of Mineral Deposits of China: Hubei Volume*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Editorial Committee of Geology of Mineral Resources in China Volume of Jiangxi. 2015. *Geology of Mineral Resources in China Volume of Jiangxi*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Editorial Committee of the Discovery History of Mineral Deposits of China. 1996. *The Discovery History of Mineral Deposits of China*. Beijing: Geological Publishing House, 1-245 (in Chinese)
- Fu JG, Li GM, Guo WK, Dong SL, Zhang H, Li YX, Zhang LK and Jiao YJ. 2025. The discovery of Miocene basic rocks and its significance for the petrogenesis and mineralization of leucogranites in Luozha area, Xizang. *Acta Petrologica Sinica*, 41(3): 820-836 (in Chinese with English abstract)
- Gruber PW, Medina PA, Keoleian GA, Kesler SE, Everson MP and Wallington TJ. 2011. Global lithium availability. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5): 760-775
- Guo WM, Ma SC, Sun Y, Zhao Z, Zhong HR and Yao LS. 2019. Characteristics and significance of rare metal mineralization in hot-springs of Tengchong area, Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1321-1330 (in Chinese with English abstract)
- Huang YH, Du SH and Zhou XZ. 1988. *Rocks, Deposits and Minerals of Xianghualing*. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1-255 (in Chinese)
- Huangfu G and Jiang CS. 2000. *Study on Tengchong Volcanic Activity*. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1-417 (in Chinese)
- Jiang SH, Liu C and Chen L. 2024. *Assessment Report for Mineral Reserves in the World 2024*. Beijing: Geological Publishing House, 132-138 (in Chinese)
- Kesler SE, Gruber PW, Medina PA, Keoleian GA, Everson MP and Wallington TJ. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48: 55-69
- Li GM, Fu JG, Guo WK, Zhang H, Zhang LK, Dong SL, Li YX, Wu JY, Jiao YJ, Jin CH and Huang CM. 2022. Discovery of the Gabo granitic pegmatite-type lithium deposit in the Kulagangri Dome, eastern Himalayan metallogenic belt, and its prospecting implication. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1109-1119 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Li P, Yan QG, Wang DH, Ren GL and Ding X. 2023. Geology and mineralization of the Songpan-Ganze-West Kunlun pegmatite-type rare-metal metallogenic belt in China: An overview and synthesis. *Science China (Earth Sciences)*, 66(8): 1702-1724
- Li P, Li JK, Liu QL, Wang DH, Jiang PF and Qin HB. 2024. The first LCT-type mineralized pegmatite in China: Discovery and significance of Yanlingguan spodumene pegmatite in central Shandong. *Acta Petrologica Sinica*, 40(9): 2621-2637 (in Chinese with English abstract)
- Li SQ, Ye CY, Zhao YY, Chen WX and Wang XY. 2025. Quantitative estimation of Li, Rb, Cs sources and its metallogenic significance in the brine lithium deposits in the Tibetan Plateau: A case study of Dangxiang Co. *Acta Petrologica Sinica*, 41(3): 995-1013 (in Chinese with English abstract)
- Luan SW, Mao YY, Fan LM, Wu XB and Lin JH. 1995. *Metallogeny and Prospecting of Rare Metals in the Koktokay Area*. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1-272 (in Chinese)
- Luo L, Wang YX, Mao X, Hu XL, Yang Z, Liu WH and Liu CL. 2026. Geochemical and geochronological characteristics of basalts in the Tianxinggang area within the Jitai Basin, Jiangxi Province, and their geological implications. *Acta Mineralogica Sinica*, 46(2): 295-307 (in Chinese with English abstract)
- Obradović J, Djurdjević-Colson J and Vasč N. 1997. Phytogenic lacustrine sedimentation: Oil shales in Neogene from Serbia, Yugoslavia. *Journal of Paleolimnology*, 18: 351-364
- Qin KZ, Zhao JX, He CT and Shi RZ. 2021. Discovery of the Qiongiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3277-3286 (in Chinese with English abstract)
- Rare Group, Institute of Geology and Mining, Academy of Geological Sciences. 1975. *Types of Rare Metal Deposits in China*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Sun N and Wang DT. 1958. Petrology and petrography of the gabbro and pegmatite at Tsinan, Shantung. *Acta Geologica Sinica*, 38(2): 179-200 (in Chinese with English abstract)
- Sun Y, Gao Y, Wang DH, Dai HZ, Gu WS, Li J and Zhang LH. 2017. Zircon U-Pb dating of 'Mung Bean Rock' in the Tongliang Area, Chongqing and its geological significance. *Rock and Mineral Analysis*, 36(6): 649-658 (in Chinese with English abstract)
- Sun Y, Geng XL, Zhou WZ, Chen YF, Li XF, Liu HF, Zhao BQ and Wang KB. 2023. Discussion on the occurrence status and genetic mechanism of lithium in dolomite in Jixian Group, eastern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 39(9): 2761-2777 (in Chinese with English abstract)
- Sweet WE. 1980. The geology and genesis of hectorite, Hector, California. *Geology and Mineral Wealth of the California Desert*, Dibblee Volume, 279-283
- Wang CH, Yang YQ, Wang DH, Sun Y, Chen ZY, Xie GG and Fan XJ. 2018. Discovery of amblygonite and Li-Be-Sn-Ta minerals in the Jiuling Area, Jiangxi Province. *Rock and Mineral Analysis*, 37(1): 1-12

- 108-110 (in Chinese with English abstract)
- Wang CH, Wang DH, Chen C, Liu SB, Chen ZY, Sun Y, Zhao CH, Cao SH and Fan XJ. 2019. Progress of research on the Shilizing rare metals mineralization from Jiuling-type rock and its significance for prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1359-1373 (in Chinese with English abstract)
- Wang CH, Wang DH, Liu SB, Xu JX, Qin JH, Qin Y, Liu JY, Zhao Z, Feng WJ, Liu ZQ, Zhao RY and Guo CL. 2022. New discovery and regional prospecting potentiality of greisen-type lithium mineralization in the Shilei tungsten and tin deposit, Southern Jiangxi Province. *Geology in China*, 49(6): 1834-1844 (in Chinese with English abstract)
- Wang DH, Chen YC, Xu ZG, Li TD and Fu XJ. 2002. Study on Metallogenic Series and Regularities of Altay Metallogenic Province. Beijing: Atomic Energy Press. 1-493 (in Chinese)
- Wang DH, Chen YC, Xu J, Zou TR, Xue CJ, Luo JL, Luo YN, Wu GY, Li ZW, Yu JJ, Yan SH, Yang JM, Fu XJ, Fu XF, Fu DM, Chu YS, Wei L and Li XY. 2005. Cenozoic Mineralization in China. Beijing: Geological Publishing House, 1-853 (in Chinese)
- Wang DH, Luo YN, Qu WJ, Li YQ, Fu DM, Li YG, Li CJ, Chen ZY and Fu XF. 2007. *Geology, Geochemistry and Exploration of PGE Deposits in SW China*. Beijing: Geological Publishing House, 1-335 (in Chinese)
- Wang DH, Li PG, Qu WJ, Yin LJ, Zhao Z, Lei ZY and Wen SF. 2013. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China. *Science China (Earth Sciences)*, 56(1): 145-152
- Wang DH, Liu LJ, Dai HZ, Liu SB, Hou JL and Wu XS. 2017. Discussion on particularity and prospecting direction of large and super-large spodumene deposits. *Earth Science*, 42(12): 2243-2257 (in Chinese with English abstract)
- Wang DH, Wang Y and Qin JH. 2022. *Mineral Geology of China: Nanling Volume*. Beijing: Geological Publishing House, 1-1086 (in Chinese)
- Wang DH, Dai HZ, Sun Y, Fu Y, Liang T, Ma SC, San JZ, Zhou SC, Fu XF, Liu XF, Liu SB, Guo WM, Tian SH, Wang ZT, Hao XF, Yang R, Liang B, Hou KJ, Wang JH, Guo XJ, Zhang ZL, Cheng ZJ, Yu Y, Huang F, Wang CH, Liu LJ, Li C, Qin Y, Yu F, Gao JQ, Feng YG, Zhao Y, Kong WG, Hou JL and Li Y. 2023. Theory and Practice of Deep Exploration for Lithium Energy Metal Deposits. Beijing: Geological Publishing House, 1-479 (in Chinese)
- Wang H, Wang CL, Yu XC, Li Q, Liu DH and Yan K. 2023. Geological characteristics of the brine type of potassium-lithium deposit in the Jitai basin. *Geology of Chemical Minerals*, 45(4): 289-295 (in Chinese with English abstract)
- Wang KX, Wu G, Zhang C, Wu ZX and Sha B. 2024. Characteristics, mineralization model and exploration model of the Velasto lithium-tin polymetallic deposit in Inner Mongolia. *Western Resources*, (6): 135-140 (in Chinese)
- Wang P, Liu XB, Yin ZS, Liu JJ, Tang XJ and Feng ZH. 2025. Brief discussion on the hydrochemical characteristics of brine-type lithium ore in Zigong area and its significance for prospecting. *China Well and Rock Salt*, 56(2): 6-8 (in Chinese with English abstract)
- Xie YW, Zhang YQ, Zhong SL and Li XH. 1999. Trace element characteristics of the Cenozoic high-K alkaline magmatic rock series in the eastern Erhai, Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 76-82 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Fu XF, Zhao ZB, Li GW, Zheng YL and Ma ZL. 2019. Discussion on relationships of gneiss dome and metallogenic regularity of pegmatite-type lithium deposits. *Earth Science*, 44(5): 1452-1463 (in Chinese with English abstract)
- Yang YQ, Wang DH, Liu SB, Liu LJ, Wang CH and Guo WM. 2020. The co-occurrence mechanism of two types of spodumene ore bodies and their prospecting significance in Jiaikan, Sichuan Province. *Acta Geologica Sinica*, 94(1): 287-302 (in Chinese with English abstract)
- Yang YQ, Liu SB, Wang DH, Dai HZ, Liu LJ and Li X. 2023. Discussion on the difference of metallogenic characteristics and genesis of the Jiajika and Ke'eryin rare metals ore fields in western Sichuan. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(3): 419-433 (in Chinese with English abstract)
- Yu F, Yu Y, Wang DH, Gao JQ, Wang CH and Guo WM. 2022. Application of Li isotope in geothermal fluid-rock interaction: A case study of modern Li-rich geothermal water in western Sichuan. *Acta Petrologica Sinica*, 38(2): 472-482 (in Chinese with English abstract)
- Yuan ZX, Bai G and Yang YQ. 1981. Porphyry-type rare-metallic deposits: An important type of rare metallic deposit. *Geological Review*, 27(3): 269-273 (in Chinese with English abstract)
- Yue DB, Liao XJ, Chen JZ, Wang ZX, Yang XJ and Song JZ. 2025. Geological characteristics and genesis of ore-controlling structures of the Murong spodumene deposit in Yajiang County of Western Sichuan. *Geology and Exploration*, 61(1): 64-73 (in Chinese with English abstract)
- Zheng MP, Xing EY, Zhang XF, Li MM, Che D, Bu LZ, Han JH and Ye CY. 2023. Classification and mineralization of global lithium deposits and lithium extraction technologies for exogenetic lithium deposits. *Geology in China*, 50(6): 1599-1620 (in Chinese with English abstract)
- Zou TR, Zhang XC, Jia FY, Wang RC, Cao HZ and Wu BQ. 1986. The origin of No. 3 pegmatite in Altayshan, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 5(4): 34-48 (in Chinese with English abstract)
- Zou TR and Li QC. 2006. *Rare and Rare Earth Metallic Deposits in Xinjiang, China*. Beijing: Geological Publishing House, 1-284 (in Chinese)
- ### 附中文参考文献
- 柴琚, 江大勇, 周敏, 孙作玉, 齐宁远, Motani R, Tintori A. 2022. 贵州新民石门坎三叠系关岭组底部火山凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及意义. *地质论评*, 68(3): 845-862
- 陈德潜, 赵光瓚, 朱中行. 1982. 是“斑岩型”还是“花岗岩型”稀有金属矿床? ——与袁忠信等同志商榷. *地质论评*, 28(5): 478-480
- 陈平, 柴东浩. 1997. 山西地块石炭纪铝土矿沉积地球化学研究. 太原: 山西科学技术出版社, 1-267
- 陈祥云, 吴俊华, 唐维新, 谢春华, 龚敏, 王光辉, 周雪桂, 高原, 周先军, 邓茂春, 李艳军, 聂晓亮, 赖长金, 张福神, 李仁泽, 张家琪, 魏俊浩. 2023. 赣西地区新探明巨量花岗岩型锂矿资源. *地球科学*, 48(10): 3957-3960
- 邓万明. 1998. 青藏高原北部新生代板内火山岩. 北京: 地质出版社, 1-179
- 地质科学研究院地质矿产所稀有组. 1975. 中国稀有金属矿床类型. 北京: 地质出版社
- 付建刚, 李光明, 郭伟康, 董随亮, 张海, 李应棚, 张林奎, 焦彦杰. 2025. 西藏洛扎地区中新世基性岩的发现及其对淡色花岗岩成岩成矿的意义. *岩石学报*, 41(3): 820-836
- 郭唯明, 马圣钊, 孙艳, 赵芝, 钟海仁, 姚奎珊. 2019. 云南腾冲热泉中稀有金属矿化特征及其意义. *地质学报*, 93(6): 1321-1330
- 皇甫岗, 姜朝松. 2000. 腾冲火山研究. 昆明: 云南科技出版社, 1-417
- 黄蕴慧, 杜绍华, 周秀仲. 1988. 香花岭岩石矿床与矿物. 北京: 北京科学技术出版社, 1-255
- 江思宏, 刘超, 陈雷. 2024. 全球矿产资源储量评估报告(2024). 北京: 地质出版社, 132-138

李光明, 付建刚, 郭伟康, 张海, 张林奎, 董随亮, 李应栩, 吴建阳, 焦彦杰, 金灿海, 黄春梅. 2022. 西藏喜马拉雅成矿带东段嘎波伟晶岩型锂矿的发现及其意义. 岩石矿物学杂志, 41(6): 1109-1119

李建康, 李鹏, 严清高, 王登红, 任广利, 丁欣. 2023. 松潘-甘孜-西昆仑花岗伟晶岩型稀有金属成矿带成矿规律. 中国科学(地球科学), 53(8): 1718-1740

李鹏, 李建康, 刘秦龙, 王登红, 姜鹏飞, 覃海宝. 2024. 中国首例太古宙 LCT 型矿化伟晶岩——鲁中雁翎关锂辉石伟晶岩的发现及意义. 岩石学报, 40(9): 2621-2637

李胜群, 叶传永, 赵元艺, 陈文西, 王新元. 2025. 青藏高原盐湖卤水锂矿 Li、Rb、Cs 来源定量估算及其成矿意义: 以当雄错为例. 岩石学报, 41(3): 995-1013

栾世伟, 毛玉元, 范良明, 巫晓兵, 林金辉. 1995. 可可托海地区稀有金属成矿与找矿. 成都: 成都科技大学出版社, 1-272

罗璐, 王延欣, 毛翔, 胡新露, 杨振, 刘文浩, 刘成林. 2026. 江西省吉泰盆地天星岗玄武岩地球化学、年代学特征及指示意义. 矿物学报, 46(2): 295-307

秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 施睿哲. 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿的发现及意义. 岩石学报, 37(11): 3277-3286

孙鼎, 王德滋. 1958. 济南辉长岩及伟晶岩的研究. 地质学报, 38(2): 179-200

孙艳, 高允, 王登红, 代鸿章, 顾文帅, 李建, 张丽红. 2017. 重庆铜梁地区“绿豆岩”中碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩矿测试, 36(6): 649-658

孙艳, 耿晓磊, 周炜智, 陈云飞, 李晓峰, 刘何凡, 赵保强, 王克冰. 2023. 冀东蓟县群白云岩中锂资源的成因与赋存状态研究. 岩石学报, 39(9): 2761-2777

王成辉, 杨岳清, 王登红, 孙艳, 陈振宇, 谢国刚, 凡秀君. 2018. 江西九岭地区三稀调查发现磷锂铝石等锂铍锡钽矿物. 岩矿测试, 37(1): 108-110

王成辉, 王登红, 陈晨, 刘善宝, 陈振宇, 孙艳, 赵晨辉, 曹圣华, 凡秀君. 2019. 九岭式狮子岭岩体型稀有金属成矿作用研究进展及其找矿意义. 地质学报, 93(6): 1359-1373

王成辉, 王登红, 刘善宝, 许建祥, 秦锦华, 秦燕, 刘金宇, 赵正, 冯文杰, 刘战庆, 赵如意, 郭春丽. 2022. 赣南石雷钨锡矿云英岩型锂矿找矿新发现及其区域成矿潜力分析. 中国地质, 49(6): 1834-1844

王登红, 陈毓川, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律研究. 北京: 原子能出版社, 1-493

王登红, 陈毓川, 徐珏, 邹天人, 薛春纪, 罗君烈, 骆耀南, 伍广宇, 李志伟, 余金杰, 闫升好, 杨建民, 傅旭杰, 付小方, 傅德明, 楚莹石, 魏琳, 李晓焰. 2005. 中国新生代成矿作用. 北京: 地质出版社, 1-853

王登红, 骆耀南, 屈文俊, 李云泉, 傅德明, 李佑国, 李纯杰, 陈振宇, 付小方. 2007. 中国西南铂族元素矿床地质、地球化学与找矿. 北京: 地质出版社, 1-335

王登红, 李沛刚, 屈文俊, 雷志远, 廖友常. 2013. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价. 中国科学(地球科学), 43(1): 44-51

王登红, 刘丽君, 代鸿章, 刘善宝, 侯江龙, 吴西顺. 2017. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向. 地球科学, 42(12): 2243-2257

王登红, 王岩, 秦锦华. 2022. 中国矿产地质志·南岭卷. 北京: 地质出版社, 1-1086

王登红, 代鸿章, 孙艳, 付勇, 梁婷, 马圣钊, 三金柱, 周四春, 付小方, 刘喜方, 刘善宝, 郭唯明, 田世洪, 王振涛, 郝雪峰, 杨荣, 梁斌, 侯可军, 王炯辉, 郭旭吉, 张忠利, 成志军, 于扬, 黄凡, 王成辉, 刘丽君, 李超, 秦燕, 于泓, 高娟琴, 凤永刚, 赵悦, 孔维刚, 侯江龙, 李阳. 2023. 锂能源金属矿产深部探测理论与实践. 北京: 地质出版社, 1-479

王焕, 王春连, 余小灿, 李强, 刘殿鹤, 颜开. 2023. 吉泰盆地卤水型钾锂矿成矿地质特征. 化工矿产地质, 45(4): 289-295

王可祥, 武广, 张超, 吴作秀, 沙斌. 2024. 内蒙古维拉斯托锂锡多金属矿床特征、成矿模式与勘查模型. 西部资源, (6): 135-140

王鹏, 刘晓博, 尹中山, 刘加杰, 唐显军, 冯振华. 2025. 浅谈自贡地区卤水型锂矿水化学特征以及对找矿的意义. 中国井矿盐, 56(2): 6-8

谢应雯, 张玉泉, 钟孙霖, 李献华. 1999. 云南洱海东部新生代高钾碱性岩岩浆岩痕量元素特征. 岩石学报, 15(1): 76-82

许志琴, 付小方, 赵中宝, 李广伟, 郑艺龙, 马泽良. 2019. 片麻岩穹窿与伟晶岩型锂矿的成矿规律探讨. 地球科学, 44(5): 1452-1463

杨岳清, 王登红, 刘善宝, 刘丽君, 王成辉, 郭唯明. 2020. 四川甲基卡两类锂辉石矿体共存机制及其找矿意义. 地质学报, 94(1): 287-302

杨岳清, 刘善宝, 王登红, 代鸿章, 刘丽君, 李鑫. 2023. 川西甲基卡和可尔因矿田稀有金属成矿特征差异性及成因探讨. 地球学报, 44(3): 419-433

于泓, 于扬, 王登红, 高娟琴, 王成辉, 郭唯明. 2022. 锂同位素地球化学在地热流体水岩反应中的应用——以川西现代富锂热泉研究为例. 岩石学报, 38(2): 472-482

袁忠信, 白鸽, 杨岳清. 1981. 一种重要的稀有金属矿床类型——斑岩型稀有金属矿床. 地质论评, 27(3): 269-273

岳大斌, 廖兴健, 陈加中, 王章翔, 杨秀娟, 宋九洲. 2025. 川西雅江木绒锂辉石矿床地质特征及控矿构造成因分析. 地质与勘探, 61(1): 64-73

郑绵平, 邢恩袁, 张雪飞, 黎明明, 车东, 卜令忠, 韩佳欢, 叶传永. 2023. 全球锂矿床的分类、外生锂矿成矿作用与提取技术. 中国地质, 50(6): 1599-1620

中国地质矿产信息研究院. 1996. 国外矿产资源. 北京: 地震出版社, 219-223

《中国矿产地质志·湖北卷》编委会. 2023. 中国矿产地质志·湖北卷. 北京: 地质出版社

《中国矿产地质志·江西卷》编委会. 2015. 中国矿产地质志·江西卷. 北京: 地质出版社

《中国矿床发现史·江西卷》编委会. 1996. 中国矿床发现史·江西卷. 北京: 地质出版社

邹天人, 张相宸, 贾富义, 王汝聪, 曹惠志, 吴柏青. 1986. 论阿尔泰 3 号伟晶岩脉的成因. 矿床地质, 5(4): 34-48

邹天人, 李庆昌. 2006. 中国新疆稀有及稀土金属矿床. 北京: 地质出版社, 1-284