

对能源金属矿产资源基地调查评价基本问题的探讨

——以四川甲基卡大型锂矿基地为例

王登红¹⁾, 王瑞江²⁾, 付小方³⁾, 孙 艳¹⁾, 王成辉¹⁾, 郝雪峰³⁾,
刘丽君¹⁾, 潘 蒙³⁾, 侯江龙¹⁾, 代晶晶¹⁾, 田世洪¹⁾, 于 扬¹⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2) 中国地质科学院, 北京 100037; 3) 四川省地质调查院, 四川成都 610081

摘 要: 能源金属矿产是指可在能源领域发挥重要作用的金属矿产资源, 而大型能源金属矿产基地作为国家目标开展调查评价, 也是新事物。四川西部甲基卡一带锂资源十分丰富, 成矿条件优越, 而锂作为 21 世纪的能源金属, 将为解决我国能源危机、环境保护等瓶颈问题发挥重要作用。本文通过对甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价的工作实践, 探讨了在“能源+金属”类矿产资源基地进行调查评价时所遇到的基本问题, 包括目标任务、基本原则、立项依据、创新驱动、技术路线、工作内容及其他应注意的问题, 为同类大型矿产资源基地的工作部署提供参考, 同时也为科学决策、合理开发锂资源提供依据。通过川西甲基卡一带以锂为主大型能源金属资源基地的调查评价, 不但可提高矿产地质调查程度和资源储量的可靠程度, 进一步摸清资源家底, 为带动整装勘查、建设大型勘查开发基地提供资源保障, 而且可以为整个川西地区能源金属的调查评价提供示范; 通过创新驱动包括查明锂、锂同位素及其共伴生组分的赋存规律, 提高综合研究和利用程度, 为能源金属在高新技术领域中的高效开发提供科学依据; 通过统筹规划, 合理部署, 有序推进, 不但可将资源优势变成经济社会优势、造福地方百姓, 也可以为把川西地区建设成为新能源基地、引领新兴产业的发展提供科学依据。

关键词: 能源金属; 大型资源基地; 矿产调查; 锂; 甲基卡

中图分类号: P618.71; P624.6 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2016.04.09

A Discussion on the Major Problems Related to Geological Investigation and Assessment for Energy Metal Resources Base: A Case Study of the Jiajika Large Lithium Mineral Resource Base

WANG Deng-hong¹⁾, WANG Rui-jiang²⁾, FU Xiao-fang³⁾, SUN Yan¹⁾, WANG Cheng-hui¹⁾, HAO Xue-feng³⁾,
LIU Li-jun¹⁾, PAN Meng³⁾, HOU Jiang-long¹⁾, DAI Jing-jing¹⁾, TIAN Shi-hong¹⁾, YU Yang¹⁾

1) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) Geological Survey of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610081

Abstract: Energy metallic minerals are significant and irreplaceable in the energy field. To build large metallic mineral base as a national goal is also a new thing in investigation and assessment. Lithium as a 21st century energy mineral will play an important role in solving the bottleneck problems such as energy crisis and environmental protection in China. In Jiajika of western Sichuan, there exist rich lithium resources and superior metallogenic conditions. Based on the working practice of comprehensive investigation and assessment in Jiajika

本文由中国地质调查局地质大调查项目“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查”工程“川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价”、“稀有稀土稀散矿产调查”(编号: 201200010063; 1212011220804)和“中国矿产地质与区域成矿规律综合研究(中国矿产地质志)(编号: 1212011220369)”联合资助。

收稿日期: 2016-03-01; 改回日期: 2016-04-01。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王登红, 男, 1967 年生。研究员, 博士生导师。主要从事矿产资源研究。E-mail: wangdenghong@sina.com。

large lithium mineral resource base, this paper discusses the fundamental problems which will emerge in investigating and assessing the “energy + metal” type mineral resources base, such as the target tasks, basic principles, project basis, innovation drive, technical route, and work content. This can not only offer reference for work deployment in the same kind of large mineral resource bases but also provide the basis for scientific decision and reasonable development of lithium resources. To carry out the investigation and assessment in large energy metallic resources base dominated by lithium in western Sichuan Jiajika can increase the degree of mineral geology survey and reliability of the reserves, further investigate resources base, drive the exploration, provide resources guarantee for establishing large exploration and development base to provide resources, and establish a demonstration for the survey evaluation in the whole western Sichuan region. Innovation drive including finding out occurrence regularity of lithium, lithium isotope and associated components for improving the comprehensive research and utilization degree will provide a scientific basis for the efficient development of the energy metal in the field of high and new technology. The overall planning and rational deployment can not only turn resource advantage into economic and social advantages and benefit the local people but also supply scientific basis for the construction of the western Sichuan region into a new energy base so as to lead the development of emerging industries.

Key words: energy metals; large resources base; mineral investigation; lithium; Jiajika

进入 21 世纪以来,矿产资源的调查评价与找矿勘探面临着新的形势,尤其是矿产资源勘查开发规模化、集约化、国际化的新趋势,必然要求“找大矿、找好矿”(陈毓川等,1989;王登红等,2016),大矿大开、小矿小开的传统模式已不能适应今后矿产资源全球化配置的客观需要。因此,危机矿山资源接替、重要矿产潜力评价、整装勘查、深部探测等一系列立足于解决能源资源领域重大问题的工作/项目,陆续上马,取得了显著成果。其中,大型矿产资源基地调查评价也是“十五”以来就受到国家重视并立项的重要工作,但是,如何对“大型矿产资源基地”(而不是一般的矿产地)进行调查评价?采用什么样的技术路线?主要开展哪些工作?注意哪些问题?与传统的找矿工作又有什么不一样?等等,都是需要探讨的。“十三五”开局以来,国家对于能源矿产的调查更加重视,但传统的以生物化石能源为主导的石油、天然气、煤等的开发利用面对着环境保护愈来愈高的社会呼声,遇到了新情况(路甬祥,2014)。那么,在能源领域能不能找到突破口并引领新兴产业的发展?本文以四川甲基卡锂矿资源基地的调查评价为例,结合近年来取得的工作经验,围绕上述问题进行初步的研讨。

1 大型矿产资源基地调查评价的目标任务

大型矿产资源基地的调查评价,也是地质找矿工作的内容之一,但与一般找矿工作的目的是不同的。找矿以发现矿点、矿化区或矿床为目的,并对其进行初步地质经济评价(工业远景评价),为进一步选择矿床勘探地区(或地段)、编制国民经济发展规划提供必需的矿产资源和地质、技术经济资料;而大型矿产资源基地的调查评价,不仅仅是找矿,

而且是要找到能够为建设大型矿产资源开发利用的资源基地的“大矿床”或相对集中的一系列矿床,以保障矿业可持续发展。至于多大的矿产资源规模才算得上“大型基地”,目前还没有形成统一的意见,因为取决于资源储量本身(先天因素)和开发利用的产能需求(后天因素)等多重因素。一般认为,大型矿产资源基地,在地质上至少要探明超大型规模的储量(相当于5个大型矿床),而且相对集中,不能分散(否则就不能成为“基地”);在满足国家需求方面,至少能满足50年的可持续的开发利用,从而形成产业基地;在社会经济效益方面,不但要占据举足轻重的地位,而且要对国家和地方经济发展起到重要作用;在科技和人才方面,不但要有科技含量、创新潜力而且要引领产业的发展。比如,四川的攀枝花钒钛磁铁矿、内蒙古包头的白云鄂博稀土矿和湖南郴州的柿竹园有色金属矿产资源基地,都是我国公认的大型矿产资源基地,在世界上也是举足轻重的,在一定的历史时期占有不可替代的地位,分别成为钒钛、稀土和矽卡岩型白钨矿等的勘查开发、综合利用、科技创新与人才培养的“基地”。显然,攀枝花、白云鄂博和柿竹园这样的矿产资源基地是我们今后找矿的方向,尽管此类矿床本身也由于天造地设而并非十全十美,但无疑具有十分重要的战略意义。

当前,我国过分依赖石油、煤炭、天然气等常规能源所面临的安全问题、环境问题日益突出,一方面对外依存度居高不下,严重影响到经济安全、社会安全乃至国家安全,另一方面又因为污染严重而影响到人民群众的健康安全。如何寻找新能源,部分甚至大部分替代传统的石油、天然气及煤炭等常规生物化石能源,已经成为全球关注的头等大

事。有没有无污染的金属能源可以有效改变能源结构呢? 有, 锂就是其中之一。锂是新兴产业发展不可或缺的战略资源, 既可以储能(如锂电池)也可以节能还可以产能(如核聚变发电), 既高度军用也普遍民用(如心脏起搏器), 因而被称为“21 世纪的能源金属”(王淦昌, 1998; 王秀莲等, 2001; 游清治, 2013; 王瑞江等, 2015; 王登红等, 2016)。在当前矿业不景气的大前提下, 锂金属的价格保持在 40 万元/t, 甚至在铁、铜、铅锌等传统金属矿产和煤、石油等大宗矿产品价格一路下滑的情况下, 锂的价格仍然在上涨(到 44 万元/t)。这充分说明, 开展锂资源的调查评价, 无论是现今还是在今后的一段时间内, 都将具有重要的社会经济意义。

四川西部具有锂、稀土、稀散金属矿产资源的区位优势, 同时也拥有以成都和绵阳为中心城市的高新技术研发基础, 尤其是汽车发动机的研发潜力巨大, 市场和资金均不是太大的问题。川西又属于贫困、民族地区, 迫切需要摆脱原始的粗放经济模式、实现跨越式发展。因此, 甲基卡大型锂矿资源基地的综合调查评价, 不但具有良好的经济效益(按 60 万吨氧化锂计, 潜在经济价值 1 200 亿元, 预期投入产出比约 1:2 500。如按能源金属计价, 投入产出比更大, 可达 1:4 800), 社会效益和政治效益也将是显著的, 在引导新兴产业发展方面将起到良好的示范和带动作用。

目前全世界锂金属的年消耗量大约在 n 万吨, 初步预测甲基卡及外围地区氧化锂资源潜力可达 $n \times 100$ 万吨(含探明储量), 显示了极其良好的找矿前景, 预期可保障锂工业可持续发展 50 年以上。但是, 锂资源是如何分布的, 哪个区块的资源最好, 开发哪个区块的资源对生态环境的影响最小, 哪个区块的潜在经济价值最大, 都还没有调查清楚, 还需要通过国家公益性项目的投入, 查明资源家底, 带动商业性勘查, 为科学开发、合理开发、最大效益地开发利用珍贵的锂资源提供科学依据。

总之, 甲基卡大型能源金属资源基地调查评价的目的, 是要尽快摸清资源潜力, 及时取得更大的找矿突破, 为国家找出一个世界级的优质锂矿, 积极引领新兴产业的发展。

2 大型矿产资源基地调查评价的基本原则

找矿的原则包括为国家社会服务的原则、综合原则、点面结合原则和经济原则等。显然, 大型矿产资源基地的调查评价, 同样要遵循这些原则, 而且更加严格并与时俱进, 比如, 环境保护的原则。回顾近百年来我国“大型矿产资源基地”的勘查历史, 当前形势下要找到新的“大型矿产资源基地”,

仍然有一定的原则需要遵循:

- 以国家目标为调查评价的首要任务;
- 以成矿规律为靶区圈定的基本依据;
- 以野外调查为找矿验证的主要手段;
- 以有序部署为合理勘查的有效保证;
- 以技术创新为快速突破的不二法门;
- 以综合评价为提升价值的根本出路;
- 以引领产业发展为基地的立足之本。

一般性的找矿工作, 能找到矿产地就算达到目的, 但“大型矿产资源基地”不但要满足国家社会的重大需求而且对新兴产业的发展具有引领作用。那么, 在当前形势下, 是再找一个白云鄂博、攀枝花或者柿竹园还是另辟蹊径? 围绕国家目标, 即, “既要金山银山也要绿水青山”, 对于甲基卡大型矿产资源基地来说, 一方面要解决资源问题, 另一方面也是解决能源而且是新能源问题, 再一方面也是为引领新兴产业发展提供契机。以锂和稀土为代表的新兴产业矿产资源, 是近年来全球勘查的热点, 被称为“关键金属(critical metal)”。锂不但是关键金属矿产, 也是能源金属, 上至氢弹爆炸, 下到老百姓的手机电池, 均不可或缺。据报道, 1 g 锂用于发电的话所产生的能量可以代替 3.4 t 标准煤; 20 kg 的锂用于核聚变发电的话, 可以满足 8 万户家庭 1 年的需要; 生产 100 亿度电的锂反应堆, 只需要 10 t 金属锂(王乃银, 1989; 吴荣庆, 2009)。因此, 国际上启动了“小太阳计划”, 旨在“从根本上解决能源问题”。笔者认为, 要从根本上解决能源问题为时尚早, 但无疑可以逐步减少生物化石能源的用量, 有助于环境保护, 而且可以避免核裂变技术民用所带来的放射性污染和大众心理问题。

3 大型矿产资源基地调查评价的立项依据——主攻矿种和地区选择

显然, 大型矿产资源基地的立项不同于一般的找矿项目, 需要十分慎重, 不但要选对地区而且要选好矿种; 不但要能找得到矿, 而且要找得到大型、超大型矿; 不但要能够为矿山建设提供资源保障, 而且要引领产业发展尤其是战略性新兴产业的发展。前述攀枝花、白云鄂博和柿竹园均如此。对于甲基卡大型基地的立项来说, 成矿条件好, 能够找得到大矿, 而且所勘查的主要矿种——锂(及共伴生的铍、钽、铯、锡等)恰好是当前战略性新兴产业发展所需的“关键金属”。此外, 前期工作也为今后的快速评价奠定了较好的基础。

甲基卡位于青藏高原的东部, 海拔在 4 000 m 以上, 区域性的地质工作尤其是找矿工作是在新中

国成立以后开展的。在 1959 年群众报矿的基础上,多家地质队和研究所在区内开展过地质调查和找矿工作,初步确定了甲基卡矿区及其外围稀有金属的远景和工业意义,但区域地质调查工作滞后,直到 20 世纪 80 年代中期才完成 1:20 万康定、新龙、禾尼三幅联测工作,通过 1:20 万康定幅区域化探扫面,初步查明有锂等稀有元素的异常。1:5 万标准图幅的区调工作目前还没有完成(矿调已立项,地调则 2016 年才立项)。20 世纪 80 年代以来,围绕松潘—甘孜造山带和“三江”成矿带区域成矿尤其是稀有金属区域成矿、成矿系列和甲基卡典型矿床的成矿机制等关键性基础地质和成矿问题,进行了一系列调查研究,初步查明区内花岗伟晶岩型稀有金属成矿作用与印支晚期花岗岩浆成穹作用密切相关,总结了构造-花岗岩浆穹隆构造的几何特征、变质变形特征、成矿特征和成矿条件,初步厘定了矿床的成矿系列,构建了构造-成矿模式,指出了找矿方向(唐国凡和吴盛先, 1984; 侯立玮和付小方, 2002; 王登红等, 2004, 2005; 李建康等, 2007; 陈毓川等, 2010), 为 2006—2013 年间的锂资源潜力评价和成矿预测奠定了基础。

甲基卡具有独特的区域成矿条件,不同于国内外其他稀有金属矿床。在川西众多硬岩型(花岗伟晶岩型)锂矿床中,以甲基卡规模最大(超大型),品位最富,共伴生矿产最多(Be、Nb、Ta、Rb、Cs、Sn),经济价值最大,而且埋藏浅、开采技术条件佳、选矿性能好,是川西伟晶岩型锂辉石矿床的典型代表。甘孜州目前已发现稀有金属矿产地 78 处,其中大型矿床 6 处,中型 5 处,小型 6 处,矿点 4 处,但总体工作程度低,找矿前景大。通过四川省地质局甘孜队、404 地质队、402 地质队等单位的详查和勘探,以往在甲基卡发现花岗伟晶岩脉 498 条,其中工业矿脉和矿化伟晶岩 114 条,求获各级 Li_2O 资源量 102.6 万吨、BeO 3.4 万吨、 $(\text{Nb}+\text{Ta})_2\text{O}_5$ 1.35 万吨(《中国矿床发现史·四川卷》编委会, 1996)。20 世纪 90 年代来,各探、采矿权人又相继开展了详查和勘探。经四川省国土资源厅 2011 年底的储量核查,甲基卡 17 条矿脉 Li_2O 累计查明资源储量为 100.4 万吨。2011 年以来,中国地质调查局设立了“全国三稀金属资源战略调查”工作项目,2012 年升格为计划项目,均将甲基卡作为重点工作地区。2015 年起,在中国地质调查局 9 大计划 50 项工程之一的“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产调查”工程之下,设立有“全国稀有稀土稀散矿产调查”项目,又将甲基卡作为重点,并加大投入。2015 年 6 月 30 日—7 月 2 日,中国地质调查局李金发副局长等领导在野外现场检查之后,明确将甲基卡地区

的锂资源调查评价作为中国地质调查局的工作重点,并决定自 2016 年起单独立项并加大投入。中国地质调查局及承担项目的中国矿产资源研究所和四川地质调查院各级领导高度重视,全力保障公益性地质工作的开展并为带动商业性勘查奠定基础。

2012—2014 年间,通过“我国三稀金属资源战略调查”,项目组在甲基卡取得成矿规律、成矿预测、综合找矿方法与验证等多方面的突破性进展,新发现 8 条(X01~X08)锂矿化伟晶岩脉(Li_2O : 1.3%~2.60%),并对 X03 号矿化脉开展了钻探验证,证实为一条巨大的锂辉石稀有金属矿脉,称为“新三号脉”(按发现顺序为第三号,也正好与新疆可可托海“老三号脉”呼应)。经储量估算,新增 333+334 类氧化锂资源储量 64.31 万吨(已达超大型规模),使得整个甲基卡矿田的锂辉石资源储量超过澳大利亚的格林布什而有望成为世界第一(Partington et al., 1995; 王登红等, 2013b; 付小方等, 2015; 刘丽君等, 2015)。此外,据地质、物探和化探调查成果显示,甲基卡地区除已查明露头矿脉之外,浮土掩盖区可能存在隐蔽伟晶岩矿脉,初步预测甲基卡及外围地区 Li_2O 资源潜力可达 300 万吨,找矿前景良好。但是,总体上看,川西地区基础地质调查和矿产地质调查、稀有金属矿集区和远景区工作程度较低,因此,自 2016 年起设立“川西大型锂矿资源基地综合调查评价”项目,仍然是必要的,目标是明确的,依据是充分的,意义也是十分重大的。

4 大型矿产资源基地调查评价的创新驱动

大型矿产资源基地的调查评价不同于一般性的找矿,能源金属大型资源基地的调查评价更需要创新驱动。不同类型的大型资源基地存在着各不相同的具体问题,针对不同的实际问题,需采取不同的技术创新手段以查明资源、综合开发并保护环境。

4.1 鉴于矿产地质调查程度和资源储量的可靠程度不高,资源家底亟待查清,迫切需要创新成矿预测和潜力评价的理论与技术方法

甲基卡稀有金属的调查工作程度总体偏低,现已发现的 500 余条伟晶岩脉中,矿化脉有 114 条,达详查-勘探程度者仅仅 17 条;尚有众多伟晶岩的产出形态、规模、含矿性缺乏详实的调查,亦无工程揭露和取样控制,加之受当时分析检测水平的限制,早期取样分析多为半定量,致使一些矿体的品位和资源量的可靠性偏低。需要加强综合地质调查,及时部署 1:5 万区调和矿调,用 2 至 3 年时间面上快速展开,保证重点突破。另外,电法测量显示,新三号矿脉在南北走向的延伸方向上尚未封闭;重磁扫面成果也显示深部为隐伏岩体,有巨大的热源区;

除已查明露头矿脉外,第四系覆盖区可能存在隐蔽型伟晶岩矿脉,具进一步找矿的潜力和前景。需要在现有新三号脉找矿成果的基础上,面上拓展,对已圈定的异常继续开展验证评价,在走向、倾向等三度空间内创新预测方法,以控制远景资源量,为实现快速突破提供依据。

4.2 覆盖区找矿难度大,需进一步探索、创新有效的找矿方法并迅速推广运用

甲基卡矿田北部第四系覆盖严重,前人认为成矿条件差,找矿难度大,因而将主要的地质工作放在矿田南部,“就脉找矿”。这就为寻找隐伏矿体或半隐伏矿体留下了较大的找矿空间。2012—2015年间,在地质综合分析的基础上,结合遥感解译填图,通过采取重磁测量优选靶区—物探法定位—化探定性—多元信息分析—钻探验证的勘查技术方法,又新发现了若干条锂辉石矿化脉,初步实现了隐蔽型伟晶岩矿床的找矿突破和科研成果的快速转化。所建立的勘查模型和综合找矿方法,为隐蔽型伟晶岩型锂矿的找矿突破提供了技术示范,但还需要加强科技攻关,深入解剖典型矿床,总结成矿规律,完善找矿标志尤其是地球物理标志,优化技术方法,结合成矿理论的创新,进一步探索有效的找矿方法,并迅速推广运用到川西的其他伟晶岩分布区。

4.3 对共生组分的综合研究程度较低,需要创新思路,引领高新技术领域的应用研发

甲基卡稀有矿石中锂品位高,矿石中共生和伴生有用组分较多,但研究程度低,前期工作是20世纪80年代以前完成的,分析检测多属定性和半定量;近年未专门对稀有矿物及稀有金属元素的共生赋存状态进行过研究,以至于稀有金属赋存规律不清,综合利用滞后,故需加强对锂及共生稀有元素赋存状态的研究,提出综合利用的合理化建议。甲基卡新三号脉新增氧化锂资源量60万t,相当于潜在经济价值1200亿元,若以当前全球年消费量4万t计,可满足全世界15年的用量。但是,如以锂同位素发电计算,理论上可保障全世界48年的发电需求。因此,只有把锂辉石、氧化锂、常规金属锂和锂同位素以不同的产品方式分别加以评价,才能取得最大的预期成果,才能评价出矿产资源的最大经济、社会效益,才能从“供给侧”引领产业和经济发展。

4.4 坚持科学发展观,实施统筹规划,将资源优势变成经济社会优势,造福地方百姓,引领新兴产业布局

为加快发展节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等战

略性新兴产业,国家相关部委及四川省制订了一系列发展规划。对川西地区锂资源的调查也要整体规划,尤其是在“十三五”期间(2016—2020年),要通过基础地质调查和公益性矿产调查,把中央的工作、地方的工作、企业的工作纳入一个大盘子统一部署。摸清家底、试点示范,注重面上推广。锂作为能源金属新材料,更要注重新材料新能源基地的布局,积极探索新机制,通过政府部门主导,在国家、部门、四川省和甘孜州的矿产勘查专项规划基础上,具体制订出区内开展与能源金属相关的地质矿产基础调查、稀有矿产整装勘查、跨区资源整合的总体规划和实施方案,并从矿山→选矿→冶炼→提纯→合成→电池全资源产业链的角度,制订出具有川西特色的战略性新兴产业以及科技创新、生态环境保护与整治的发展路线图。

4.5 创新管理思维,保证既要金山银山也要绿水青山

甲基卡矿田位于四川甘孜州康定、道孚、雅江三县交界的藏区,社会经济发展相对滞后,自然生态环境脆弱,但矿产资源又十分丰富。因此,一方面要加快大型矿产资源基地的调查评价,为把资源优势转化为经济优势奠定扎实的基础,另一方面也需要在地质调查评价的一开始就认真做好矿山生态环境的保护工作,为发展循环经济、打造绿色矿山资源基地做出示范。

4.6 能源金属的专项调查,更需要理论和技术创新

战略性新兴产业的发展为甲基卡的深入调查评价带来了新契机。尽管近年来已经初步探明新增了64万吨的氧化锂,但针对能源金属来说,用于核聚变反应的锂主要是锂的同位素 ${}^6\text{Li}$ 而不是 ${}^7\text{Li}$ 。虽然自然界中锂同位素的组成相对固定,但不同地质体的锂同位素组成明显不同。那么,伟晶岩中尤其是甲基卡矿区伟晶岩中锂同位素的组成是怎么样,还需要开展锂同位素地质调查。

5 大型矿产资源基地调查评价的技术路线

大型矿产资源基地调查评价的技术路线侧重于:①通过合理的勘查,查明资源家底,为整装勘查提供依据;②以点带面,高效利用,带动区域矿产资源的高端开发,将资源优势转化为区域经济优势,引领产业发展或者转型升级;③不拘泥于按规范、按部就班地“找矿”,始终贯彻野外实地调查与理论创新、技术创新密切结合,也为同类型矿产资源的一般性找矿工作提供示范。对于甲基卡这样的高原地区、民族地区、经济落后地区,同时也是新兴能源金属的矿集区和矿业开发利用的新区,为

了达到引领新兴产业发展、促进地方经济跨越式发展的预期目标,在调查评价的过程中还需要遵循如下技术路线:

(1)资料搜集侧重于潜力评价和战略分析

既要全面搜集工作区内已有的地物化遥等各类资料与成果,特别是工作区内探、采矿权地勘资料、钻探成果以及专题研究的新成果,更要深入分析本地区是否有条件成为一个大型矿产资源勘查开发的基地,满足国家和社会可持续发展的基本需求。

(2)各类专项地质调查要围绕资源评价和找矿突破这一工作重点

对于甲基卡工作区,第四系约占 60%以上的面积,坡积物、残坡积物、沼泽堆积物及冰碛物等普遍覆盖,厚度一般在 7~10 m。如此广泛分布的第四系堆积物给地质找矿工作带来了很大的难度,要想通过常规的地质填图、在有限的地质路线和控制点的前提下,很容易只圈定为“第四系”而漏矿。新三号脉的发现过程就表明,区内第四系残积物、残坡积物中的伟晶岩脉、含锂辉石伟晶岩脉,以及堇青石角岩化黑云母片岩的碎块和岩块,对隐伏基岩有一定的指示意义,特别是部分具残积特征的含锂辉石伟晶岩块,在区内成带密集分布,经遥感解译具明显的影像特征,部分经钻探验证,其下基岩多为含锂辉石伟晶岩脉。因此,通过第四系覆盖区基岩地质填图这样的专项调查,可以弥补常规地质填图调查评价之不足,有助于快速突破。

(3)充分发挥遥感等先进技术的作用

遥感技术的运用,不但可以起到宏观、客观把握全局的作用,更重要的是可以大大提高工作效率。对青藏高原及新疆、内蒙古等高原、荒漠地区,利用 Worldview 高精度多波段数据及 ETM⁺ 数据进行全区遥感矿化蚀变信息提取,结合地、物、化、矿产资料进行筛选和优化,建立区内地层、岩体、控岩控矿构造、矿体和矿化蚀变等解译标志,并对遥感信息所圈定出的异常进行解译和判断,为专项地质填图圈定各类地质体提供补充依据。这在近年来的地质调查工作中取得了很多经验和成果。因此,甲基卡这样的新区也可以在专项地质填图中以遥感解译为先导,结合路线地质调查,以穿越法为主,追索法为辅,对不同类型的第四系进行区分和填绘。路线间距和地质点密度根据构造复杂程度、基岩出露情况、自然地理条件等实际情况而定,以解决问题为原则,不平均使用工作量。

(4)地球化学探测工作区的矿种及剥蚀程度

化探是找矿的基础性手段之一,但对于不同的

工作区也应该具体问题具体分析。比如,对于甲基卡这样的第四系覆盖区,已有的土壤地球化学资料显示:Li 元素的背景含量相当于全国平均水平的若干倍,具有显著的异常特征,化探异常的元素与主矿种也是吻合的。对新三号脉的验证也证明,显著的 Li 异常特征及高的叠加强度可以作为缩小找矿靶区的可靠证据,尤其是化探异常与物探异常(激电测量异常)相吻合,可推断是否有含锂辉石矿化脉体的存在。但是,当一个矿体剥蚀程度很高时,其顶部土壤也可以高度地富集成矿元素,但矿已经剥蚀掉了。

(5)地球物理探测矿化的范围、矿体的三度空间部位

物探工作是钻探验证的主要依据之一,十分重要,在当前和今后钻探工作量越来越少的情况下,更要精心获得地球物理的相关信息。比如,甲基卡地区已有的激电中梯测量成果显示,工作区花岗伟晶岩具有密度低而电阻率高的特点,视电阻率为 8 000~15 000 $\Omega\cdot\text{m}$,与变质岩片岩的电阻率低的高导性特点(视电阻率为 3 000~3 500 $\Omega\cdot\text{m}$)形成强烈反差。采用 800 mAB 距,10 m 左右铅垂厚度的花岗伟晶岩脉均有较好的显示。花岗伟晶岩视电阻率异常呈带状,并有分枝复合现象。对新三号脉验证的结果也证明了伟晶岩脉与视电阻率有良好的对应关系,可用于面中求点圈定异常,定位预测伟晶岩脉,大致了解锂矿化伟晶岩的规模、走向等分布情况,为钻探验证提供依据。

(6)地质雷达

地质雷达是浅部地球物理勘探中的一种高分辨率、高效率、实时探测方法,具有较强的抗干扰能力,用于确定地下介质分布,对地表覆盖条件下确定矿体具有较好的效果,是下一步甲基卡第四系浅层覆盖区花岗伟晶岩找矿的所需要使用的新技术方法手段,也值得区域上尝试。

(7)取样钻

取样钻主要用于揭露掩盖深度一般不超过 3 m 的矿体和异常。由于甲基卡地区一般残坡积掩盖较厚,且为藏区珍贵药材虫草的主要产区,槽探等传统人工揭露施工对环境破坏较大,因此以取样浅钻代替槽探,可以达到绿色勘探的目的。

(8)机械钻探

对各种综合异常进行直接的验证,离不开机械钻探。钻探岩心取样是找矿必不可少的手段,也是获得地质样品和求算资源储量的基本技术手段。

(9)采样与岩矿测试

通过典型矿床研究,查明岩(矿)石的结构、构

造、矿物成分及其共生组合、蚀变现象,为岩(矿)石的准确命名、矿石类型的划分、矿石可选性的研究及矿床成因的分析提供资料;查明矿石中有益、有害元素或组分的种类、含量,确定矿石质量,为矿产资源的合理开发和综合利用提供最直接的科学资料。

6 大型矿产资源基地调查评价的工作内容

一般性找矿工作的主要任务,包括:①根据矿产资源形势分析,确定找矿项目与地区;②研究成矿条件和矿化信息,开展成矿预测;③综合运用有效的技术手段和方法,在有利地区或地段进行找矿,以发现矿点、矿化区或矿床;④通过初步的地质经济评价和工业远景分析,为勘探靶区及勘探方案的选择提出可行的建议。这样的主要任务同样是大型矿产资源基地调查评价工作所需要完成的,但还有更高的要求,比如,为满足建设大型矿山的要求,需要找到超大型以上的矿产资源总量;为满足物尽其用的要求,要开展综合利用的实验,等等。此外,不同历史时期、不同成矿区带、不同矿种的资源基地,其主要任务并不相同,宜在立项时具体问题具体分析。

根据前述大型矿产资源基地评价的目的、原则,对于甲基卡这样的以“能源金属”为创新点、切入点和产业发展新起点的“资源基地”,其主要工作内容包括 1:5 万综合地质调查、特殊地貌区矿产地质遥感调查、典型矿床解剖与稀有金属赋存状态研究、能源金属专项调查与锂同位素填图、锂同位素分析测试技术方法创新、矿区及外围新兴产业相关高铝材料高纯石英资源综合地质调查、稀有金属矿产资源高效利用综合评价、环境地质调查评价以及资源开发利用的产业规划与新兴产业布局规划等。

对于甲基卡特殊地貌区矿产地质的遥感调查,对于青藏高原这样的大量消耗体力的地区、露头不好但或多或少又有出露的地区具有与众不同的意义。甲基卡工作区海拔 4 200 m 以上,变化于 4 200~4 600 m,地表普遍被第四系残坡积物和草地覆盖。第四系残坡积物以往也被认为是冰漂砾。另外,该地区属于雷击区,气候恶劣,有效工作时间短。因此,如何提高工作效率又不漏掉重要的矿化信息,如何合理部署地质勘查工程(乃至今后的地质采矿工程)又不破坏生态环境,如何区别冰漂砾(及其他第四系残坡积物)与矿化露头,等等,都需要高新技术作为支撑手段,尤其是迫切需要新的宏观地质调查与深部探测的技术方法来取代传统的槽探等方法,宏观地质调查侧重于航空遥感技术,

包括空中雷达和地面雷达技术的结合,在甲基卡一带开展实验,争取通过地质与技术的密切结合,达到既保护环境、提高工作效率又能发现异常、查证异常的目标。工作重点是在常规多种遥感技术手段的基础上,针对不同地质问题,采用新资料 and 不同比例尺的资料,在高分辨率遥感解译成果的支撑下,可采用“空中雷达+探地雷达+背包钻”的立体探测新技术组合,争取宏观控制矿化大格局,不漏掉 2 m 以上的矿化异常点,为地面综合调查和重点异常的查证聚焦目标,提高工作效率,指明方向。

对于锂同位素的专门调查,主要包括三方面内容:①对矿区二云母花岗岩、伟晶岩、细晶岩、片岩等不同岩石类型进行全岩 Li 同位素研究,探讨岩石形成机理和不同岩石之间的锂同位素分馏机制;②通过系统采集不同钻孔和地表(以钻孔为主)的锂辉石和电气石分别进行 Li 和 B 同位素研究,探讨成矿流体来源、演化轨迹及其探寻流体活动中心,为找矿勘探工作部署提供理论依据;③与同位素专项地质填图和综合调查工作一起,完成锂同位素样品的系统分析测试,为地质填图提供技术服务,为锂辉石大型能源金属基地的综合调查评价以及今后的合理、高效、绿色的开发利用提供科学依据。当然,锂同位素的专项调查与分析测试技术的创新是密不可分的,在解决技术问题的前提下,以新能源金属综合调查为“绿色高起点”,摸索出一套全新的同位素地质调查方法,为新能源金属矿产资源的调查评价提供试点示范,也是完全可能的。

对于大型矿产资源基地综合评价与高效利用的研究,也是甲基卡大型能源金属基地调查评价过程中必不可少的环节。甲基卡地区拥有丰富的矿产资源,以稀有金属为主,共伴生有钨锡等有色金属和红柱石等高铝材料类非金属和电气石、高纯石英等与新兴产业密切相关的非金属矿物原料,但其资源量究竟多大,如何开发利用,如何引导新兴产业的发展,却是需要充分地调查研究的。有些矿产地如果只回收锂辉石而没有回收长石、石英等非金属,会产生巨大的尾矿坝,不但容易产生环境问题还要占据草场;有的矿产地在采矿时需要“揭盖”,其顶板围岩如果到处散放乱堆,同样占据草场,容易引起纠纷,不利于社会和谐发展;而围岩中的高铝材料矿物原料如果能回收利用,则不但可以形成资源产业、产生经济效益,而且可以减少环境污染(包括物理污染)问题。为了高效利用综合评价,根据国家最新规定和《中国制造 2025》的精神,本次高效利用综合评价,旨在综合调查的基础上开展评价工作,以“无尾矿”、生态环境负面效应最小为最终方向,回过头来再制订矿产品的开发利用方案,为合理、高

效、绿色地开发甲基卡这一锂矿资源奠定基础。

对于环境地质的调查评价,在以往的同类工作或者一般性的找矿工作中并非必不可少,但对于大型矿产资源基地的调查评价来说是至关重要的。青藏高原东部是生态脆弱地区,甲基卡一带又是少数民族(主要是藏民族)世代游牧的草场分布区,局部地块也设立有生态保护区。如何取得既要“金山银山”又要“绿水青山”的双赢效果,就必须开展环境地质的调查评价。甲基卡地区以锂为主,与铜铅锌等亲硫元素及镉、铬等环境敏感度高的元素富集区不同,其在水体、土壤、植被乃至动物体内的含量要求,目前所知甚少,环境承受力也没有先例可循,但从含锂矿泉水、心脏起搏器含锂等常识看,锂也并非不利于人体。甲基卡一带尾矿区水体中野鸭群集、怡然自得的客观现象,也说明锂辉石矿山开采的环境问题不是不可解决的。下一步的环境现状调查将根据甲基卡的特点,结合环境要素影响评价的工作等级,确定各环境要素的现状调查范围,并筛选出应调查的有关参数。拟采取的调查方法包括搜集资料法、现场调查法和遥感调查法三种;主要包括自然环境调查和社会环境调查两大部分。其中,自然环境调查的主要内容包括矿区所在的地理位置、地质、地形地貌、气候与气象、地表水环境、地下水环境、大气环境、土壤与水土流失、动植物与生态等。社会环境调查的主要内容包括甲基卡一带社会经济、文物与“珍贵”景观、人群健康状况等。对已采矿区拟开展污染源调查,以了解环境污染现状并预测污染的发展趋势。在调查时要将污染源、环境、生态和人体健康作为一个系统进行整体考虑,搞清楚污染物的物理化学特征、污染物进入环境的途径、迁移转化规律以及是否对人体健康造成影响等方面的问题。

对于锂资源开发利用的产业规划与新兴产业布局的规划,具有非常重要的现实和战略意义。甲基卡是我国最重要的伟晶岩型锂辉石资源基地,但川西还有扎乌龙、可尔因等重要类型相似的矿集区,也有望成为同类型的资源基地。是一哄而上,还是有序地调查评价与开发利用,就需要科学规划。在综合调查的基础上,通过摸清资源家底,查明不同类型矿产资源的空间分布规律,明确甲基卡地区以锂为主各类矿产资源综合开发利用的方向,变资源优势为经济优势,同时又能在保护环境的前提下引领新兴产业的发展,实现民族地区经济跨越式发展和可持续发展,是锂资源开发利用的产业规划与新兴产业布局规划的基本思路 and 根本要求。但如何科学谋划、统筹兼顾、合理部署,就需要专门的调查研究,一方面掌握国内外发展的大趋势,另

一方面查明甲基卡大型锂多金属矿业基地的资源家底,再一方面还需要掌握国家政策和区域经济发展(包括生态发展和引领新兴产业发展)等方方面面的综合诉求,了解现有锂矿山企业的生产状况、存在问题和发展瓶颈,提出对策和措施。

7 大型资源基地评价过程中应注意的问题

对于大型矿产资源基地的调查评价,所面临的社会、政治、经济、环境等方面的问题远比一般性矿产地质调查复杂,需要通盘考虑,全面分析,合理布局,其战略意义是显而易见的。目前看来,甲基卡地区通过合理勘查,查明资源家底,以点带面,带动整个川西地区锂资源的整装勘查和高端开发,将资源优势转化为经济优势、社会优势、实现少数民族地区跨越式发展,是十分可能的。但是,如何实现甲基卡锂资源的社会、经济等不同层面上的效益最大化,同时又要保护环境、树立起绿色生态矿业发展的新样板,就需要各方面共同努力。为此,围绕甲基卡大型锂矿资源基地的综合调查评价,还需要注意以下问题。

7.1 战略定位问题

需要从新的角度深入认识锂资源的重要性。除了考虑锂在冶金化工、医药卫生等传统领域的使用价值之外,一定要把锂在金属能源领域的新用途考虑得十分周全,其经济价值也具有天壤之别。常规锂金属每吨 40~44 万元,但用作能源金属的话,其价值是 1 g 相当于 3.4 t 标准煤,而每吨标准煤的价格至少 500 元。因此,常规金属锂和能源金属锂的潜在价值要相差数百倍。因此,作为锂矿产品方案的设计是头等大事,也是决定矿产资源调查评价的重要依据。

7.2 资源家底问题

需要站在全球角度重新认识川西锂资源的战略地位。目前来看,川西重点是甲基卡,其锂资源占有全球锂资源的百分比到底多大,其资源总量究竟是多少,也是决定今后开发利用决策的关键。大矿大开还是大矿小开,需要统筹部署。

7.3 技术创新问题

甲基卡一带处于海拔 4 200 m 以上的高原地区,地表普遍覆盖有第四系残坡积物和草地。气候寒冷,有效工作时间短。为了提高工作效率又不破坏生态环境,迫切需要新的地质调查与深部探测的技术方法来取代传统的槽探等方法。目前正在采用探地雷达、背包钻、高分辨率遥感等新技术在甲基卡一带开展试验,争取通过地质与技术的密切结合,达到既保护环境、提高工作效率又能发现异常、查证异常的目的。

7.4 环境保护问题

甲基卡地区处于高原草场和湿地保护区, 矿业开发多多少少会对环境产生影响。这就需要全面评估, 争取矿业开发与环境保护双赢。实际上, 当地牧民仍然处于游牧状态, 过度放牧也造成了草场的承载压力过大。通过规范化的矿业开发, 变游牧为定居并保护草场、变漫山遍野的采矿为定点采矿、变单一矿山采矿为综合开发, 是可以最大程度地利用自然资源而把对生态环境的不利影响降低到最低限度的。

7.5 社会发展问题

尽管甲基卡一带拥有丰富的矿产资源, 也有矿山企业建厂生产, 但当地牧民的经济条件、生活水平乃至文化程度亟待得到根本性的改变。通过现代化的矿业规划, 除了锂矿山的采矿之外还要带动整个产业链的发展, 加强基础设施建设, 转移部分劳动力, 从而根本性地改变农牧民的生活水平和受教育程度, 不但是社会发展的必然趋势也是解决民族问题、经济问题的重要途径。

8 结论

综上所述, 大型能源金属矿产资源基地的调查评价, 具有不同于一般性矿产调查、不同于危机矿山资源接替、不同于整装勘查的目标任务、基本原则、立项依据、技术路线和工作内容, 更加强调国家目标、战略意义、创新驱动、环境评价、综合利用和统筹规划。甲基卡大型锂矿资源基地综合调查, 不但要调查地质情况、资源情况、开发利用情况、社会经济情况、生态环境情况, 还需要调查新兴产业发展的趋势及其区域经济发展情况, 尤其是需要从能源金属的新角度来调查。锂资源作为 21 世纪能源金属, 对于引领新兴产业发展、对于高起点绿色发展、对于经济落后的高原藏区跨越式发展, 具有十分重要的现实意义和战略意义。在“我国三稀矿产资源战略调查”工作的基础上, 已经在甲基卡外围的东北部取得了初步的找矿突破, 今后将通过“川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价”, 实现地质找矿的快速突破, 为国家找到一个超大型规模以上的锂辉石资源基地, 为建设国家级乃至世界级锂矿基地提供资源保障, 并以锂资源现代化开发引领新兴产业的发展, 也有助于促进地方经济的跨越式发展。

致谢: 近年来甲基卡的找矿突破既是成矿规律长期研究的结果, 也是近年来艰苦实践的收获, 更是各级领导正确立项和长期支持的结果。中国地质调查局钟自然局长多次听取汇报并亲自指导, 李金发副

局长 2016 年 6 月 30 日—7 月 2 日带领傅秉铎所长、韩子夜主任、徐学义主任及张生辉处长、尹成明处长等到甲基卡工作区进行野外调查并现场指导工作, 对项目组的工作给予了充分肯定和鼓励; 国土资源部地勘司、开发司、储量司及规划司等部门领导刘连和、王昆、于海峰、许大纯、姚华军、鞠建华等及中国地质调查局总工程师室严光生主任、李基宏副主任、资源评价部多届主任陈仁义、薛迎喜、龙宝林和邢树文等领导, 以及四川国土资源厅、四川地勘局、甘孜州政府、康定县、雅江县及道孚县政府等都对我们的工作给予了方方面面的大力支持; 承担单位中国地质科学院矿产资源研究所王宗起副所长、毛景文副所长、邢树文副所长及四川地调院赵春院长、冯健书记、阚泽忠副院长及陈毓川院士、裴荣富院士、郑绵平院士和四川地调院侯立玮教授级高级工程师、中国地质科学院矿产资源研究所邹天人、杨岳清、袁忠信、徐珏和白鸽研究员及国土资源部高咨中心黄崇轲教授级高工等老专家, 也自始至终指导本项工作, 在此一并致谢。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (Nos. 201200010063, 1212011220804 and 1212011220369).

参考文献:

- 《中国矿床发现史·四川卷》编委会. 1996. 中国矿床发现史·四川卷[M]. 北京: 地质出版社: 116-118.
- 陈毓川, 李文祥, 朱裕生. 1989. 巨型、大型和世界级矿床地质——找矿的总趋势[J]. 地球科学进展, (6): 37-41.
- 陈毓川, 王登红, 付小方, 唐菊兴, 李光明, 李厚民, 肖克炎, 梁婷, 应立娟, 王成辉, 陈世平, 陈郑辉, 刘峰, 郭春丽, 李建康, 高晓理, 徐志刚, 李华芹, 屈文俊, 周汝洪, 侯立玮, 刘德权, 朱明玉, 傅旭杰. 2010. 中国西部重要成矿区带矿产资源潜力评估[M]. 北京: 地质出版社.
- 付小方, 袁满平, 王登红, 侯立玮, 潘蒙, 郝雪峰, 梁斌, 唐屹. 2015. 四川甲基卡矿田新三号稀有金属矿脉的成矿特征与勘查模型[J]. 矿床地质, 34(6): 1172-1186.
- 侯立玮, 付小方. 2002. 松潘-甘孜造山带东缘穹隆状变质地质体[M]. 成都: 四川大学出版社.
- 李建康, 王登红, 张德会, 付小方. 2007. 川西伟晶岩型矿床的形成机制及大陆动力学背景[M]. 北京: 原子能出版社.
- 刘丽君, 付小方, 王登红, 郝雪峰, 袁满平, 潘蒙. 2015. 甲基卡式稀有金属矿床的地质特征与成矿规律[J]. 矿床地质, 34(6): 1187-1198.
- 路甬祥. 2014. 清洁、可再生能源利用的回顾与展望[J]. 科技导报, 32(28/29): 15-26.
- 唐国凡, 吴盛先. 1984. 四川省康定县甲基卡花岗伟晶岩锂矿床地质研究报告[R]. 西昌: 四川省地质矿产局攀西地质大队.
- 王登红, 付小方. 2013b. 四川甲基卡外围锂矿找矿取得突破[J]. 岩矿测试, 32(6): 987.
- 王登红, 李建康, 付小方. 2005. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属

矿床的成矿时代及其意义[J]. 地球化学, 34(6): 541-547.

- 王登红, 刘丽君, 刘新星, 赵芝, 何哈哈. 2016. 我国能源金属矿产的主要类型及发展趋势探讨[J]. 桂林理工大学学报(待刊).
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 代晶晶, 陈郑辉, 李德先, 屈文俊, 邓茂春, 付小方, 孙艳, 郑国栋. 2013a. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. 中国地质, 40(2): 361-370.
- 王登红, 邹天人, 徐志刚, 余金杰, 付小方. 2004. 伟晶岩矿床示踪造山过程的研究进展[J]. 地球科学进展, 19(4): 614-620.
- 王淦昌. 1998. 21 世纪主要能源展望[J]. 核科学与工程, 18(2): 97-108.
- 王乃银. 1989. 令人垂青的金属能源[J]. 今日科技, 20(9): 32.
- 王瑞江, 王登红, 李建康, 孙艳, 李德先, 郭春丽, 赵芝, 于扬, 黄凡, 王成辉, 刘家军, 何哈哈, 郑国栋, 黄文斌, 周园园, 李晓妹, 刘丽君, 蔡肖, 赵汀, 宋扬. 2015. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用[M]. 北京: 地质出版社.
- 王秀莲, 李金丽, 张明杰. 2001. 21 世纪的能源金属——金属锂在核聚变反应中的应用[J]. 黄金学报, 3(4): 249-253.
- 吴荣庆. 2009. 新能源稀有金属锂的保护与合理开发利用[J]. 中国金属通报, 42(1): 38-39.
- 游清治. 2013. 锂工业的发展与展望[J]. 新疆有色金属, 42(2): 147-149.

References:

- CHEN Yu-chuan, LI Wen-xiang, ZHU Yu-sheng. 1989. The general prospecting trend of giant, large and world-class deposits[J]. Advance in Earth Sciences, (6): 37-41(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, FU Xiao-fang, TANG Ju-xing, LI Guang-ming, LI Hou-ming, XIAO Ke-yan, LIANG Ting, YING Li-juan, WANG Cheng-hui, CHEN Shi-ping, CHEN Zheng-hui, LIU Feng, GUO Chun-li, LI Jian-kang, GAO Xiao-li, XU Zhi-gang, LI Hua-qin, QU Wen-jun, ZHOU Nu-hong, HOU Li-wei, LIU De-quan, ZHU Ming-yu, FU Xu-jie. 2010. The mineral resources potential evaluation of important mineralization belt in West China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Editorial Committee of "The discovery history of mineral deposits of China·Sichuan". 1996. The discovery history of mineral deposits of China·Sichuan[M]. Beijing: Geological Publishing House: 116-118(in Chinese).
- FU Xiao-fang, YUAN Lin-ping, WANG Deng-hong, HOU Li-wei, PAN Meng, HAO Xue-feng, LIANG Bin, TANG Yi. 2015. Mineralization characteristics and prospecting model of newly discovered X03 rare metal vein in Jiajika orefield, Sichuan[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1172-1186(in Chinese with English abstract).
- HOU Li-wei, FU Xiao-fang. 2002. Dome shaped metamorphic bodies in the eastern margin of Songpan-Ganzi orogenic belt[M]. Chengdu: Sichuan University Press(in Chinese).
- LI Jian-kang, WANG Deng-hong, ZHANG De-hui, FU Xiao-fang. 2007. Mineralization mechanism and continental tectonics of pegmatite type deposits in Western Sichuan, China[M]. Beijing: Atomic Energy Press(in Chinese with English abstract).
- LIU Li-jun, FU Xiao-fang, WANG Deng-hong, HAO Xue-feng, YUAN Lin-ping, PAN Meng. 2015. Geological characteristic and metallogeny of Jiajika-style rare metal deposit[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1187-1198(in Chinese with English abstract).
- LU Yong-xiang. 2014. Review and prospect of clean, renewable energy utilization[J]. Science & Technology Review, 32(28/29): 15-26(in Chinese).
- PARTINGTON G A, MCNAUGHTON N J, WILLIAMS I S. 1995. A review of the geology, mineralization and geochronology of the Greenbushes Pegmatite[J]. Western Australia., Economic Geology, 90: 616-635.
- TANG Guo-fan, WU Sheng-xian. 1984. The geological report of Jiajika granitic pegmatite type lithium deposit in Kangding, Sichuan[R]. Xichang: Panxi Geological Team of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources(in Chinese).
- WANG Deng-hong, FU Xiao-fang. 2013b. The lithium prospecting breakthrough in Jiajika peripery, Sichuan[J]. Rock and Mineral Analysis, 32(6): 987(in Chinese).
- WANG Deng-hong, LI Jian-kang, FU Xiao-fang. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan and its significance[J]. Geochimica, 34(6): 541-547(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, LIU Li-jun, LIU Xin-xing, ZHAO Zhi, HE Han-han. 2016. The discussion on the kinds and development tendency of energy metal minerals in China[J]. Journal of Guilin University of Technology(in Chinese with English abstract) (in press).
- WANG Deng-hong, WANG Rui-jiang, LI Jian-kang, ZHAO Zhi, YU Yang, DAI Jing-jing, CHEN Zheng-hui, LI De-xian, QU Wen-jun, DENG Mao-chun, FU Xiao-fang, SUN Yan, ZHENG Guo-dong. 2013a. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources[J]. Geology in China, 40(2): 361-370(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, ZHOU Tian-ren, XU Zhi-gang, YU Jin-jie, FU Xiao-fang. 2004. Advance in the study of using pegmatite deposits as the trace of orogenic process[J]. Advance in Earth Sciences, 19(4): 614-620(in Chinese with English abstract).
- WANG Gan-chang. 1998. The prospect of main energy source in 21 century[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 18(2): 97-108(in Chinese).
- WANG Nai-yin. 1989. The favorable energy metals[J]. Today Science & Technology, 20(9): 32(in Chinese).
- WANG Rui-jiang, WANG Deng-hong, LI Jian-kang, SUN Yan, LI De-xian, GUO Chun-li, ZHAO Zhi, YU Yang, HUANG Fan, WANG Cheng-hui, LIU Jia-jun, HE Han-han, ZHENG Guo-dong, HUA Wen-bin, ZHOU Yuan-yuan, LI Xiao-mei, LIU Li-jun, CAI Xiao, ZHAO Ting, SONG Yang. 2015. The exploitation and utilization of rare-metals, rare-earth and rare-scattered metals mineral resources[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Xiu-lian, LI Jin-li, ZHANG Ming-jie. 2001. Energetic metal of the 21th century: the use of metal lithium in nuclear fusion[J]. Gold Journal, 3(4): 249-253(in Chinese).
- WU Rong-qing. 2009. The protection and reasonable exploitation of new energy rare metal lithium[J]. China Metal Bulletin, 42(1): 38-39(in Chinese).
- YOU Qing-zhi. 2013. The development and expectation of lithium industry[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 42(2): 147-149(in Chinese).