

我国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述

王登红¹⁾, 王瑞江²⁾, 孙 艳¹⁾, 李建康¹⁾, 赵 芝¹⁾, 赵 汀¹⁾,
屈文俊³⁾, 付小方⁴⁾, 江善元⁵⁾, 黄华谷⁶⁾, 冯文杰⁷⁾, 徐 平⁸⁾,
李胜苗⁹⁾, 黄新鹏¹⁰⁾, 周 辉¹¹⁾, 朱永新¹²⁾, 涂其军¹³⁾,
李新仁¹⁴⁾, 方一平¹⁵⁾, 周园园¹⁶⁾

- 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)中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037;
4)四川省地质调查院, 四川成都 610081; 5)中国冶金地质总局第二地质勘查院, 福建莆田 351111;
6)广东省地质调查院, 广东广州 510080; 7)云南省地质调查局, 云南昆明 650011;
8)江西省地质调查院, 江西南昌 330201; 9)湖南省地质调查院, 湖南长沙 410116;
10)福建省地质调查研究院, 福建福州 350013; 11)广西地质调查院, 广西南宁 530023;
12)甘肃省地质调查院, 甘肃兰州 730000; 13)新疆地质调查院, 新疆乌鲁木齐 830011;
14)内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古呼和浩特 010020; 15)中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
16)有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012

摘 要: 三稀资源是稀土、稀有和稀散资源的统称, 是新一代尖端武器、信息技术、节能环保、医药和医疗设备、高端装备制造、新材料、新能源汽车等所需要的功能材料、结构材料和关键性原料。在国土资源部和中国地质调查局的统一领导和部署下, 中国地质科学院矿产资源研究所自 2011 年组织全国 33 个单位 220 余人开展了我国三稀金属资源战略调查工作。在五年时间里, 初步建立了全国三稀调查研究的专业队伍, 研究分析了国内外三稀资源的分布、产出特征及其开发现状、选冶技术与市场供需状况, 编制了稀土矿产地、价格等多项数据库(涵盖全球); 在稀土矿山开采和建设用地压覆资源调查等多方面为矿政管理提供了技术支撑和专业服务; 在南方离子吸附型稀土开发监管和储量动态估算等技术方面取得了重要进展; 在四川甲基卡、福建永定大坪等多个地区取得了重要找矿突破; 在三稀成矿规律和赋存状态研究尤其是离子吸附型稀土成矿规律和勘查技术等方面取得了重要的理论创新和方法创新。该项工作提升了我国三稀矿产资源的理论、技术研究水平, 为通过矿产地质供给侧调查研究引导我国新兴产业的发展提供了示范。

关键词: 三稀金属; 矿产调查; 综合研究; 矿政管理; 进展综述

中图分类号: P622.6; P612 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2016.05.06

A Review of Achievements in the Three-type Rare Mineral Resources (Rare Resources, Rare Earth and Rarely Scattered Resources) Survey in China

WANG Deng-hong¹⁾, WANG Rui-jiang²⁾, SUN Yan¹⁾, LI Jian-kang¹⁾, ZHAO Zhi¹⁾, ZHAO Ting¹⁾,
QU Wen-jun³⁾, FU Xiao-fang⁴⁾, JIANG Shan-yuan⁵⁾, HUANG Hua-gu⁶⁾, FENG Wen-jie⁷⁾,
XU Ping⁸⁾, LI Sheng-miao⁹⁾, HUANG Xin-peng¹⁰⁾, ZHOU Hui¹¹⁾, ZHU Yong-xin¹²⁾,
TU Qi-jun¹³⁾, LI Xin-ren¹⁴⁾, FANG Yi-ping¹⁵⁾, ZHOU Yuan-yuan¹⁶⁾

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“我国三稀资源战略调查”、“稀有稀土稀散矿产调查”(编号: 1212011220804)、“川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价”(编号: DD20160055)、“中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务”(矿产地质志)项目(编号: DD20160346)、国家自然科学基金项目“柴达木盆地大风山特大型天青石矿床锶的富集成矿机制研究”(编号: 41402084)联合资助。

收稿日期: 2016-07-29; 改回日期: 2016-09-01。责任编辑: 张改侠。

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。

- 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) *National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*
- 4) *Geological Survey of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610081;*
- 5) *The 2nd Geoexploration Institute of China Geoexploration & Engineering General Bureau, Putian, Fujian 351111;*
- 6) *Geological Survey of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510080;*
- 7) *Yunnan Geological Survey Bureau, Kunming, Yunnan 650051;*
- 8) *Geological Survey of Jiangxi Province, Nanchang, Jiangxi 330201;*
- 9) *Geological Survey of Hunan Province, Changsha, Hunan 410116;*
- 10) *Geological Survey of Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350013;*
- 11) *Geological Survey of Guangxi, Nanning, Guangxi 530023;*
- 12) *Gansu Institute of Geological Survey, Lanzhou, Gansu 730000;*
- 13) *Xinjiang Institute of Geological Survey, Urumqi, Xinjiang 830011;*
- 14) *Geological Survey of Inner Mongolia, Huhhot, Inner Mongolia 010020;*
- 15) *Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037;*
- 16) *China Non-ferrous Metal Resources Geological Survey, Beijing 100012*

Abstract: “Three-type Rare Resources” is the general term of rare earth, rare resources and rarely scattered resources. Three-type Rare Resources have been widely used as functional, structural and key-part materials in different industries, such as sophisticated weapon, information technology, energy conservation and environment protection, pharmaceuticals and armamentarium, high-end equipment, new material and new energy vehicle. Since 2011, under the unified leadership of Ministry of Land and Resources of China (MLR) and China Geological Survey (CGS), Institute of Mineral Resources of Chinese Academy of Geological Sciences (CAGS) has gathered more than 220 research staff members from 33 institutions and organizations in China to carry out national strategic survey for three-type rare metals. Over the past 5 years, a national team engaged in the research on three-rare resources has been established to carry out scientific study and analysis of the distribution, occurrence, exploration status, ore dressing and metallurgical techniques, as well as the supply and demand of the three-type rare resources both in China and abroad. A variety of databases, including database of rare earth ore fields and rare earth prices, have been established. Supportive service has been provided for the mineral resources governance and administration in terms of rare earth mining and construction over rare earth mines. Major progress has been made in the supervision of the exploration of ion adsorbed type rare earth deposits in southern China and the dynamic evaluation of their reserves. Breakthrough has been achieved in rare earth prospecting in Jiajika in Sichuan Province and Daping in Fujian Province. Significant improvement has been fulfilled in the theoretical research on metallogenic rules and occurrence status of three-type rare resources. The above efforts and achievements have raised the theoretical and technological level of three-type rare resources research in China and guaranteed the resource basis for the rapid development of China’s new industries.

Key words: three-type rare metals; mineral resources survey; comprehensive research; governance and administration of mineral resources; progress review

在我国,稀有、稀土和分散(以下简称“三稀”)金属矿产资源的调查研究曾经投入大量的人力、财力和物力,取得了丰硕的成果,但由于保密等原因一直不为局外人所了解。早在20世纪30—40年代,原苏联地质人员曾对我国阿尔泰山南缘地区进行了稀有金属矿产勘查和开采工作,并以可可托海三号脉为基础建立了伟晶岩型稀有金属矿床的成矿理论和一整套的地质勘查、储量计算的方法体系;20世纪50—70年代,根据国家大力发展稀土金属工业急需矿产资源的形势,地质部、冶金部等部门积极组织勘查力量,在内蒙古、山东、湖南、湖北、广东、广西、四川、云南等省区部署了勘查工作,探明了一批矿产地。在北方,勘探出内蒙古白云鄂博式超大型稀土-铌矿床、扎鲁特旗“八〇一”大型碱性花岗岩铌-稀土矿床,山东微山县郗山热液脉状

稀土矿床以及吉林大栗子铁矿伴生稀土矿和辽宁丹东、凤城等河流冲积型独居石砂矿等。在南方,50—60年代集中勘探了一批风化壳、残坡积和河流冲积型砂矿。70年代以来,赣、湘、粤、闽、黔、川等省勘查稀土矿产又取得了新的重大进展,尤其是牯牛坪大型高品质、采选冶稀土矿床的发现改变了我国稀土资源格局。2011年,在国土资源部和中国地质调查局的统一部署下,中国地质科学院矿产资源研究所组织实施了“我国三稀金属资源战略调查”工作项目,2012年升格为“我国三稀资源战略调查”计划项目,2015年改为“稀有稀土稀散矿产调查”二级项目,工作周期为2012—2015年,该项目已于2016年5月4—5日在北京通过了验收。上述三个项目(简称“三稀项目”)虽然工作性质从软科学研究到“硬科学”找矿,但实际上是一个有机

整体,先后有33个单位220余人参加,并形成了一个专业化很强的技术团队。

1 成果概述

1.1 地质找矿的成果

三稀项目组在2012—2015年间,为国家提交三稀资源矿产地7处、矿点21处、矿(化)体42个、找矿线索9条,圈定找矿靶区144个、重点评价区5个、找矿远景区103个、综合异常8个。其中,在四川甘孜州甲基卡矿区外围实现了重要找矿突破,估算氧化锂334级别资源量88.55万t(平均品位1.41%),达超大型规模,使整个甲基卡矿田伟晶岩型氧化锂资源储量超过200万t而位居世界同类型矿床前列。同时估算共生伴生矿种(均可综合利用)的资源量为:BeO 27 972 t,平均品位0.0443%;Nb₂O₅ 774 1 t,平均品位0.0122%;Ta₂O₅ 3 441 t,平均品位0.005 4%;Rb₂O 7 002 t,平均品位0.1108%;Cs₂O 12 391 t,平均品位0.0196%;Sn 9 102 t,平均品位0.014 4%。

在福建,通过对永定大坪花岗斑岩型铌钽矿地表和深部的控制,估算333+334级Nb₂O₅资源量15 719.60 t(其中333级别资源量4 438.70 t)、Ta₂O₅资源量13 842.63 t(其中333级别资源量3 908.71 t),达大型以上规模;在福里石矿区圈定了4个以Be、Mo为主的综合异常,通过工程控制圈定了铍(钼)工业矿体,经对9条铍矿体的估算,求得334级别BeO 1 231.16 t,BeO平均品位0.208%。

在广东,新发现6处远景规模达大型以上的稀有稀土矿产地;新发现离子吸附型稀土矿点11处,其中重稀土矿点1处,轻稀土矿点10处。新增铌钽氧化物资源量24 302.87 t(333+334级别),其中,龙门永汉矿区Nb₂O₅为22 384.62 t, Ta₂O₅为1 918.25 t。新增稀土氧化物的资源量为135 110.69 t(333+334级别),其中,重稀土氧化物35 048.11 t(大埔高陂),轻稀土氧化物为100 062.58 t(乐昌禾尚田和龙门永汉);新增Rb₂O资源量7 780.33 t(333+334级别,乐昌禾尚田)。

在广西,圈出20处可供进一步勘查的稀土矿靶区,其中7处靶区估算预测资源量为大型规模、10处靶区估算预测资源量为中型规模、3处靶区估算预测资源量为小型规模,并初步估算获得稀土氧化物资源量(334)约350万吨;圈定平水底铌钽靶区、尖峰岭铍靶区2个稀有金属找矿靶区;在越城岭—猫儿山花岗岩体地区划分了茅安塘、咸水口、铜座、同禾—覃家塘、瓜里—梅溪5个稀有金属找矿预测区。以遥感异常为主,结合成矿地质条件,在钦州—防城港工作区圈定了17处稀土找矿预测区,凭祥—

龙州工作区圈定了9处稀土找矿预测区。

在云南,除了圈定出高黎贡山变质带稀有金属锂、铍找矿靶区之外,还提交了3处离子吸附型稀土矿产地,其中1个达大型规模。

在江西,新发现矿产地1处(上饶童家山铌钽矿)、矿点4处(旧路铌钽矿、浒坑—万坑铌钽矿、大港铌钽矿、东槽铌钽矿)和矿化点3处(上茜槽铍矿、茅坪铌钽矿、官田桥铍矿)。通过遥感调查新方法的研究,圈定离子吸附型稀土矿找矿远景区6个,并经实地采样,43个样点中31%达到边界品位以上。以赣南清溪岩体为重点,圈定了白石、黄屋和上堡3个可以进一步工作的靶区,估算资源量10万t,预测清溪岩体稀土远景资源量25万t。

在湖南,新发现平江县梅仙地区伟晶岩型稀有金属铌钽矿产地1处,共获铌钽氧化物资源量400 076.1 t(334)。

在新疆,划分了新疆哈龙—青河(地块)RM-Fe-Au-Cu-Ni-多金属矿带等4个重点稀有金属成矿区带,圈定成矿远景区35处,划定找矿靶区54处。系统开展了阿勒泰、阿拉山口阔依塔斯一带、西昆仑大红柳滩、塔什库尔干等4个重点调查评价区的异常查证,其中在大红柳滩一带圈定铌钽、锂矿靶区4个,预测锂资源总量25 023.16 t,其中探获资源量为7 308.73 t,有望达到中型锂矿规模。

在甘肃,划分出稀有金属成矿带22个,圈定成矿远景区32个、找矿靶区50个。发现了阿克塞县玉龙沟铌钽矿、余石山西铌钽矿,敦煌市火焰山铌钽矿,临洮县华林坪铌钽矿等矿(化)点多处;通过1:1万地质草测结合槽探,在潘家井铌钽矿靶区圈定了铌钽矿(化)体7条,在余石山西铌钽矿靶区圈定铌钽矿(化)体19条;在玉龙沟铌钽矿点通过1:1万地质草测、1:1万激电中梯测量、1:1万磁法测量工作和槽探,圈定铌钽矿化体4条。在热水泉一带通过1:5万矿产地地质调查、1:5万水系沉积物测量、1:5万遥感解译等工作,圈定了单元元素异常98个,综合异常4处。

在青海,新发现伟晶岩型稀有矿化线索6处,砂矿型稀有矿化线索1处,稀土矿化线索1处,稀散矿化线索1处。

1.2 理论创新的成果

深入总结了风化壳中稀土元素的分布规律,建立了花岗岩、火山岩及变质岩离子吸附型稀土矿床的成矿模式,提出了离子吸附型稀土矿床的形成可能不受围岩条件限制的新认识(花岗岩也是一种围岩);全面总结了稀有金属矿床的成矿机制,从34种主要矿石建造中梳理出8种作为今后找矿的重点;提出了将锂作为能源金属(而不是一般性金属)加以

评价、勘查与管理的新认识;通过对骑田岭与香花岭的对比,提出了“大岩基成矿、小岩体找矿、歪岩体最好”的认识。

1.3 技术创新的成果

除了分析测试技术方法的改进与创新外,本次工作重点针对稀土尤其是离子吸附型稀土的管理问题,创新了稀土矿山开采动态监测技术方法(获国家发明专利 1 项),提出了监测预警区域;利用遥感技术统计了荒漠化区域的面积,对稀土矿开采周边河流污染程度进行评估(获国家发明专利 1 项);赣南钻的发明不但有助于大大提高工作效率而且可以显著加大勘查深度,获国家实用新型专利;提出了稀土单元素圈矿方法,创新了稀土储量计算与动态评价的技术方法(获软件著作权 1 项)。

1.4 方法创新的成果

方法的创新,不但体现在快速调查取样方法的改进(如同时采集离子吸附型稀土矿山的地质样品、加工车间的成品半成品以及尾矿库中的尾砂样品),也体现在勘查技术方法的创新(如利用水系水化学调查方法同时解决离子吸附型稀土开采过程的污染问题和找矿方向问题),而且形成了一系列新的方法,如利用稀土精矿粉的某些理化指标可以推测原矿的来源,有助于海关缉私等管理部门追踪稀土的“来龙去脉”,利用花岗岩的风化指数及含水量等指标判断含矿性。其中,最显著的方法创新是利用赣南钻代替浅井、小圆井和浅钻来开展风化壳型矿床的勘查工作,可以提高工效(赣南钻日进尺可达 30~50 m,浅井 5~8 m),降低成本(赣南钻百米成本 0.91 万元,小圆井 3.47 万元),加大探测深度(赣南钻可大于 40 m,小圆井<12 m)。另外,还开展了稀土单元素圈矿、稀土全相和稀土浸取量等不同圈矿方法的对比研究,分析了稀土单元素圈矿与稀土氧化物总量圈矿以及储量估算的可操作性,提出了离子吸附型稀土矿评价对象为浸取相的建议;并创新性地将克里格法应用于资源储量的动态计算,取得了良好的效果(邓茂春等,2013;赵汀等,2014,2016)。

除了针对具体调查和科学问题而研究提出的方法创新之外,对于本项目的工作方法也大胆尝试,取得了多方面的经验。比如,在初步摸清了稀有稀土稀散金属开发利用现状的基础上,通俗化地提出了“稀土不土,稀有常有,稀散不散”的规律性认识,进而提出了“稀土管得住,稀有找得到,稀散用得着”的工作目标,为三稀矿产资源的矿政管理尤其是分类、分级管理提供了依据,避免了眉毛胡子一把抓。这一尝试,改变“调查工作完成实物工作量,科研工作发表 SCI 论文,管理工作靠行政推动”

的传统模式,积累了通过调查掌握信息,通过研究掌握规律,通过管理用好资源的新经验,不但有助于提高政府执法的公信力,而且为调查研究工作直接服务于社会提供了新样式。

1.5 服务于矿政管理的成果

服务于矿政管理是本项目立项的初衷。2011 年,由于市场火爆,稀土价格高涨,导致南方离子吸附型稀土矿区 40%以上存在越界开采、非法开采、环境污染等问题而被媒体曝光。为了“稀土管得住”,项目组对当时全国 106 个采矿证的 102 个矿区开展了野外调查取样、遥感成图取证、动态分析预警工作,为矿政管理部门高效执法提供了科学依据;积极配合矿政管理部门完成了稀土开采总量指标管理、稀土矿区开采开发情况实地专项调查、工程建设用地压覆稀土情况调查等工作;对国内外三稀资源分布、利用现状、需求格局、勘查开发现状等进行了全面分析,为“利用国内国外两个市场”和“一带一路”战略的实施提供了服务;建成了国内外矿产地的空间数据库(涵盖 3 389 个矿产地),集成了矿产品价格数据库、采样测试分析数据库、文献数据库、进出口贸易数据库、全国稀土矿区遥感影像数据库等。

建立了针对离子吸附型稀土矿区的水环境质量评价指标体系,以赣南不同类型稀土矿区水环境状况进行了综合评价,首次建立了基于支持向量机(SVM)的离子吸附型稀土矿山环境效应定量评价模型,将矿产地质调查工作的成果直接延伸到了环境保护领域,为稀土矿区环境污染的调查、评价与治理提供了新思路、新途径与新方法。

在稀散金属资源方面对多个有色金属矿山中稀散元素的赋存状态和利用现状等进行了评价,为稀散元素的再利用奠定了基础。

2 工作思路的创新——全程一条线

地质调查项目往往是单打一的(地区单一、学科单一、目标单一、过程单一、管理单一)，“我国三稀资源战略调查”项目在一开始就与众不同。虽然是中国地质调查局立项,但主要是为了协助国土资源部开发司调查稀土矿山的开发利用等情况(近期又延伸到为规划司、地勘司、储量司等相关部门提供服务);虽然是中国地质科学院矿产资源研究所牵头,但联合了江西省地质调查院等 13 个省级地质调查院以及中国地质科学院国家地质实验测试中心、中国科学院地球化学研究所、中国地质大学(北京)、长安大学、桂林理工大学、有色金属矿产地质调查中心、北京矿冶研究总院、赣州市矿产资源管理局等近 20 个不同性质的单位共同参加(后期还有

湖北省地质局第八地质大队的矿调项目加入); 虽然是矿产地质调查为主, 但遥感地质、水文地质、分析测试、政策研究乃至仪器设备的研发与改进, 都发挥了重要作用; 虽然各个年度的目标任务是明确的, 但各个子项目的工作性质与进度明显不一样; 虽然都围绕着稀土、稀有和稀散这三大类矿产资源开展工作, 但无论是地质调查院的项目组成员还是矿产资源所、大学的项目组成员, 实际上对三稀矿产的方方面面都不是很了解, 相当于从头开始学习。面对这种复杂状况, 项目负责人打破地调项目工作部署的常规, 提出了“摸清家底—查明规律—指导找矿—技术创新—服务矿政”这样一条主线, 并分“摸清家底”—“战略侦察”—“找矿突破”三个阶段稳步推进, 先后设立 25 个子项目, 各个子项目在统一思路的指导下, 分工协作, 相关配合, 但各有侧重。

战略研究阶段(2011 年): 在“全国重要矿产潜力评价”和“储量利用现状调查”项目中, 仅涉及三稀矿产资源中的稀土和锂, 但二者的资源家底由于种种原因而尚未真正摸清。项目启动以来, 将资料搜集、摸清家底、把握政策、提出建议作为首要目标, 总结了“稀土不土, 稀有常有, 稀散不散”的特点, 提出了“稀土管得住, 稀有找得到, 稀散用得好”的目标, 在当年国务院 17 个部门联合组织的稀土专项检查中, 发挥了积极作用。

战略侦察阶段(2012—2013 年): 在基本摸清我国三稀资源成矿规律、初步查明三稀资源家底的基础上, 2012 年的工作重点由摸家底调整为战略调查, 主要目的是让各省针对有望突破的远景区开展战略调查, 进行成矿条件与找矿潜力分析, 圈定重点靶区, 为实现找矿突破提供了依据。通过编写《我国三稀金属资源重点评价部署方案》, 明确提出“找大矿, 找好矿, 好(háo)找矿和好(hào)找矿”的指导思想, 并确定以锂、铍、钽、锆、重稀土为重点矿种, 以西北、西南和中南地区的 9 个重点成矿区带为重点工作区, 以就矿找矿、优选类型为技术路线, 以可可托海式、甲基卡式、柴达木式、南岭式等 9 个矿床式为优先找矿目标。

找矿突破阶段(2013—2015 年): 以提交矿产地或资源量为主要目标, 以重点找矿靶区验证为主要工作手段。在全国性、区域性和矿集区三个层次上进一步对阿尔泰—青河、塔里木西北缘、南岭、大兴安岭、康定—金川、攀西、格尔木—茫崖、西南三江和青藏高原西部等 9 个重点成矿区带进行优化部署, 在福建、广西、江西、湖南、青海、四川和云南设立 7 个重点工作区, 并根据成矿条件和成矿规律研究进展, 将甲基卡、南武夷和南岭东段作为

重中之重, 及时加大投入, 保证了甲基卡锂矿、永定大坪钽铌矿和赣南清溪离子吸附型稀土矿的找矿突破。2002 年甘肃与四川子项目均投入 200 万元, 但鉴于甲基卡锂矿在各方面要优于余石山等地的铷矿, 项目负责人会同主管部门商定将甲基卡的投入加大到 410 万元、675 万元和 700 万元, 有力地保证了甲基卡各项工作的开展, 但也因为经费有限而影响了西南三江南段、南岭中西段、大兴安岭等地的找矿突破。与此同时, 在中国地质调查局资源评价部组织评审验收《我国三稀金属资源重点评价部署方案》的基础上, 又编写了《全国“十三五”三稀矿产规划》和《中国锂资源调查报告》、《中国战略性新兴产业矿产调查报告》等阶段性成果, 为国土资源部组织找矿突破战略行动和中国地质调查局部署基础性矿调工作提供依据。

3 工作部署的创新——全球一张图

从“全球”—“全国”—“省/片区”—“矿田”四个尺度部署开展工作。

在“全球”尺度, 项目组全面搜集了各方面资料, 建立了境外 19 种三稀矿产资源数据库(稀土矿产地 785 个, 稀有稀散矿产地有 1 659 个), 编制了全球三稀资源分布图和贸易流向图等, 分析了世界三稀资源的特点、分布特征及国际供需现状、产能分布格局, 认为, 世界三稀矿产资源丰富, 但储量分布很不平衡, 许多矿产的大部分探明储量集中在少数国家。世界三稀矿产资源的另外一个特点是资源储量难以真实地统计, 这是因为除了锂、铍和稀土等少数矿种之外, 绝大多数矿种处于共伴生状态。由于历史的原因、技术的原因和市场的原因, 在主矿种的勘查过程中并没有对所有的三稀矿种都开展分析测试工作, 以至于主矿种中究竟伴生了多少三稀矿产资源, 实际上是一笔糊涂账。即便是计算了资源储量的矿床, 如果没有回收利用, 其上表储量也无实际意义, 对开发利用、对预测分析并无裨益。此外, 各个国家对于三稀矿产资源评价的经济、技术指标并不一致, 对各国表上的“资源储量”简单相加, 并无实际意义。

在“全国”尺度, 以本次各子项目搜集到的资料为基础, 结合潜力评价、矿业权核查等成果及本次工作数千个样品分析测试的新数据, 建立了矿产品价格数据库、采样测试分析数据库、文献数据库、进出口贸易数据库等, 并建立了国内 19 种三稀矿产资源数据库(稀土 352 个, 稀有 440 个, 稀散 653 个), 编制了中国三稀矿产地一览表、国内外三稀资源与保障图集、中国稀土矿遥感调查图集, 分析了我国三稀资源的基本特点、开发利用情况、资源总

体形势、供需格局、产业分布格局等,为矿政管理提供数据支撑和服务。统计表明,三稀矿产资源附加值远远超过常规金属,我国三稀资源具有优势地位的矿种不少,但实际情况却往往是:我国提供廉价的原材料,终端产品却不得不进口。这是我国三稀金属矿产资源的一个基本状况,迫切需要改变。如钆(Gd)这一稀土元素制成药剂之后价格提升 600 多倍(我国的钆药剂主要靠进口),但是,钆是我国的优势资源,全球使用的钆原料主要依赖于中国提供。除了 Gd 之外还有很多,如 Ge、Cd、In、Ga、Tl 等,往往是生产越多,亏本越多,从而造成国人心理上的负面影响越大。

在“省/片区”尺度上,项目选取了中南、西南、西北三个大区为重点研究对象,相关子项目密切合作,对区内三稀资源状况进行了详细调查,总结了成矿规律,圈定了找矿靶区。在 12 个三稀资源重点省份设立项目,对省内三稀资源进行摸底,建立了各省的数据库,编制了省级三稀资源分布图、成矿远景区划图及勘查工作部署图等。

在“矿田”尺度上,选取了贵州织金磷矿、四川甲基卡锂矿、新疆大红柳滩、依兰里克、华蓥山地区的锗矿、硒矿等矿床和单矿种进行了典型研究,在找矿靶区、开发利用等多个方面取得了重要进展。其中,对于甲基卡的研究,取得的找矿效果最为明显。甲基卡是一个老矿区,但以往只对少数伟晶岩脉进行了评价。根据阿尔泰成矿省伟晶岩型矿床的成矿规律以及伟晶岩及伟晶岩型矿床可以示踪造山过程的理论(王登红等, 1998, 2002; 李建康等, 2007; 陈毓川等, 2010), 王登红于 2002 年申请获得国家自然科学基金青年基金的资助,开展了我国西南主要伟晶岩矿床对大陆演化的示踪研究,认为甲基卡与阿尔泰一样,以造山运动基本结束、区域构造向稳定阶段演化的转折期成矿最佳,而甲基卡矿田马颈子岩体由于剥蚀程度高、外围构造封闭环境更易于伟晶岩矿床的保存,为本次工作部署奠定了理论基础(王登红和付小方, 2013)。

4 工作手段的创新——观测一体化

项目采用“空中”-“地表”-“微观”相结合的工作手段,充分发挥“天眼-肉眼-电眼”一体化的优势,对三稀资源开展了全方位的调查。

采用遥感技术手段,能实时高效地对离子吸附型稀土的开采活动和水土流失情况进行动态监测,也可以定量查明采矿过程中产生荒漠化的面积、程度、动态变化趋势以及治理效果。如,通过选取江西定南地区 400 km² 范围内 2011 年 12 月 24 日的 Geosy 数据为重点进行解译,经综合分析,当时共

有矿权 31 个,解译违法图斑共计 61 个,违法图斑的面积共计 13.31 km²。通过选取 2010 年 12 月的 SPOT5 数据进行稀土矿区荒漠化信息的提取,表明某矿区的荒漠化面积已近 n km²。除了研究区矿权范围内存在土地荒漠化现象外,矿权周边的盗采点也存在着严重的土地荒漠化现象,对提取出来的荒漠化区域进行面积计算,赣南 7 000 km² 范围内荒漠化面积为 n × 10 km²。

高精度遥感技术的运用不但可以快速地完成对矿权区范围内采矿活动的监测,客观、全面地记录下采矿活动的信息,而且是全覆盖的、不留空档的,大大提高了政府执法的公信力。此外,结合成矿规律和成矿预测的研究工作,哪些地块有可能成为非法盗采活动的下一个目标也是可以提前“预警”的,这就大大增强了执法工作的主动性,也降低了执法成本,为科学执法提供了成功经验。但仅仅是依靠“空中看”还是不够的,地上的“实地查”也是不可少的。

野外实地调查是验证解译结果最直接而有效的方法,它能够为遥感工作提供准确的目标信息解译标志,并检验解译结果的正确性。根据确定的目标信息对遥感影像图进行解译、提取出目标信息后,还须对解译结果进行野外实地验证和进一步的修正,提高遥感解译的准确性。此外,实地调查还采集了全国各地重要三稀矿产地的原矿石、尾矿砂及部分精矿粉的样品,通过 ICPMS 测定了近 50 项指标(包括元素含量)的系统消息(仅赣南就采集样品 777 件),既为成矿理论的研究奠定了扎实的基础,也为开发利用与矿政管理提供了科学依据。

仅仅查明了荒漠化的面积、环境污染的程度,也通过实地调查确认非法采矿活动确实存在,还是不够的。如何防患于未然、如何解决既成事实的荒漠化问题、如何既定性又能定量地查明氨氮、亚硝酸盐氮等有害物质在离子吸附型稀土矿区、镉等重金属在尾矿库及其附近水系中的迁移规律以及影响程度,也是当务之急。本次工作,利用肉眼看不见但仪器可以分析的大量测试数据以及电子探针、电子显微镜等“电眼”,在微观层面上不但获得了我国南方离子吸附型稀土矿成矿母岩的地球化学量化判别标志(如风化指数 CIA=85% 可以作为矿与非矿的一个指标),也创新了利用遥感技术获得地表水体中稀土含量的研究思路(已获得发明专利),从而打破了地质学领域物理调查与化学调查之界线,即利用遥感的光学手段获得稀土元素含量的化学信息。这不但是思路的创新,也拓展了遥感技术的应用领域,减轻了地表调查的工作强度,而且可以是全覆盖的。

通过各类“电子眼睛”的广泛使用,发现了很多新现象,为深化离子吸附型稀土成矿机制的研究提供了“微观”条件,尤其是通过对赣南足洞、寨背两个岩体的深入解剖,初步建立了花岗岩型、火山岩型、变质岩型、沉积岩型等不同母岩区的成矿模式,总结了主要类型离子吸附型稀土矿在风化壳发生、发育和消亡过程中稀土元素分布、分配、迁移、富集、贫化的基本规律,不但显著地提升了自20世纪70年代以来我国科学家建立起来的离子吸附型稀土矿的成矿理论水平,而且为解决“到哪里去寻找重稀土”这样的现实问题提供了科学依据,也给科学治理稀土和稀散元素污染问题提供了新途径。

5 项目管理的创新——全国一盘棋

全国三稀矿产调查项目是典型的多目标、跨学科融合交叉的项目,因此,项目负责人根据“全国一盘棋”但经费有限的实际情况,提出了“产”-“学”-“研”-“管”-“用”五位一体的工作理念,虽然给各子项目(2012—2014年为工作项目)下达了不同的任务,但都是总体目标任务的一部分,各有侧重,分工协作,项目办统一部署,并提出野外采样、定点定位、分析测试、数据解释等方面的项目内部技术要求,取得了显著的效果。

比如:战略研究、理论研究、技术创新与生产、管理紧密结合;重点矿集区乃至重点靶区与全国层次、大区层次和省级层次的成矿区带研究相结合(点面结合),通过将甲基卡等重点矿区的找矿突破来“以点带面”;全国层次的软科学研究与各地调院的重点评价工作密切结合;野外出现了技术难题由矿产资源所派专家及时现场指导(如四川的甲基卡、福建的大坪和福里石、新疆的红柳滩、云南的黑妈);采集的样品由中国地质科学院国家地质实验测试中心的专家及时完成高精度测试工作;国土资源部矿产资源开发司等矿政管理部门提出的应急性任务(如2012年的柳江镉污染调查,南方建设用地的稀土资源压覆情况调查,国务院组织的稀土专项检查等)由相关单位共同完成……。其中,值得指出的是,①为了提高工作效率和公信力,提出了采样点照片必须将显示实时实地经纬度的GPS、装满样品并写好样号的样品袋实地放置的要求,是其他地调工作并不要求的,属于本次工作方法的创新之一,为野外检查验收等后续工作提供了方便;②中国地质科学院国家地质实验测试中心提供的数据是包括了主要元素、微量元素和稀土元素的综合性测试结果,获得的数据是常规的单元素或者稀土总量、光谱半定量以及所谓的“野外快速滴定测试稀土含量”的常规方法所无法比拟的;③无论是2011

年的稀土采矿权、探矿权区大检查还是2012年的建设用地稀土元素资源压覆情况调查,都不是单一的一个项目或者单位完成的,比如,江西省地质调查院、广东省地质调查院、福建省地质调查院、广西地质调查院和中国地质调查局发展中心也都参加了,尽管各自的当年度的任务书中并无此类工作,体现了“全国一盘棋”、各单位大协作的优势;④重点评价区的设立,大部分是在综合研究的基础上提出的。如长安大学对于西北地区、中国科学院地球化学研究所对于西南地区、桂林理工大学对于中南地区以及中国地质大学(北京)对于钨等矿种的专门研究、中国化学矿山地质总局对于贵州新华织金磷矿中稀土可利用性的专门研究等工作,都及时、有效地补充了承担单位(中国地质科学院矿产资源研究所)之不足,发挥了积极作用;⑤承担单位责无旁贷地在项目组织、工作安排、子项目(或工作项目)任务分解、重点评价区工作部署、野外指导、检查验收等方面起到了主导作用。比如,根据锂在新兴产业中的重要性(王淦昌,1998),项目负责人经主管领导同意在新疆阿尔泰别也萨麻斯、西昆仑红柳滩和四川甲基卡等地设立了重点评价区,通过给新疆有色701地质队、新疆地质调查院和四川省地质调查院加大资金支持或直接委托等方式,保证了上述地区的找矿进展。鉴于新疆等地环境保护等方面的新情况并根据甲基卡前期工作的新认识,尤其是甲基卡外围物探、化探和野外工作的积累,明确提出了新三号脉等地的地表伟晶岩属于原地残坡积而不是“冰漂砾”的新认识,保证了钻探验证工作的开展。同时,通过野外实地调查,与项目组在现场确定了“化探定性-物探定位-钻探验证”的技术路线,提出了反用物探资料(即高阻地质体才对应含矿伟晶岩,相对的低阻体为围岩)、黑白碎石组合可能代表原始地层残坡积、化探采样应注意岩屑而不只是分散流、巨大“滚石”中定向的锂辉石排列方向有可能代表的原始产状、用三角形槽探代替矩形槽探等工作方法,并一方面从矿床成矿系列的角度进一步总结甲基卡式锂辉石矿床的成矿规律(刘丽君等,2015),另一方面由四川省地质调查院进一步建立了隐蔽型伟晶岩型稀有金属找矿评价的技术方法和流程,即:专题研究→遥感解译和地质填图→优选靶区→化探定性→物探定位→钻探验证,后又归纳为“综合研究—遥感解译和坡-残积填图—重磁测量查明岩体和伟晶岩脉就位空间—优选靶区—电法定位化探定性解释推断异常—浅成雷达探测和便携式取样查明矿脉浅表边界及产状—钻探验证控制”的第四系覆盖区立体地质综合勘查模型(王登红和付小方,2013;付小方等,2015)。安排给潘蒙、唐屹等

年轻人完成的“滚石追踪找矿法在甲基卡的应用”等文章尚未发表,但工作效果无疑是有效的。

本项工作与“产”紧密结合,主要表现在稀土的开发利用方面。受国土资源部开发司委托,对江西赣州稀土矿业有限公司名下全南县玉坑、岗下、烂泥坑等多个稀土矿区采矿证稀土采矿证申请资料进行审阅、遥感调查、现场实地采样,发现了一系列问题,尤其是稀土元素的含量根据“配分”来计算而不采纳单元元素实测数据、20世纪80、90年代下发采矿证时不注意成矿规律导致将一个矿床分割为不同采矿权区等关键性问题,提出了解决办法,得到了产业部门和企业的肯定。并向主管部门提出了年度开采指标新的计算方式、下发新采矿证应提交完整的地质勘探报告、规定采矿证年限等多项建议。

更为重要的是,本次针对离子吸附型稀土矿的调查研究,提出了利用赣南钨(前期为洛阳钨)代替钨钼钽矿、根据单元元素 ICPMS 实测数据(而不是根据总量再配分各个稀土元素的含量)圈定矿体、根据市场价格变化动态圈定矿体、利用克里格法计算资源储量等一系列新思路、新方法和新技术,不但有助于企业查明矿业权范围内的资源家底,而且可以根据市场价格等方面的动态变化、及时地调整采矿方案以争取最大限度地利用资源并获得最大的经济效益(王登红等, 2013a, b, 2015; 王瑞江等, 2015)。

在“学”方面,由中国地质大学(北京)、桂林理工大学、长安大学三所高校,就典型矿种和重点片区的三稀资源部署规划开展综合研究,为进一步部署工作指出了找矿靶区,奠定了工作基础并培养了人才。河北工程大学孙玉壮教授的团队也承担了对煤矿中三稀资源情况进行调查研究与开发利用试验的任务。

在“研”方面,由中国科学院贵阳地球化学研究所、中国地质科学院国家地质试验测试中心、中国地质科学院成都矿产综合利用研究所、中化地质总局、有色金属矿产地质调查中心等开展了有色金属矿山中稀散元素赋存状态研究、三稀元素分析测试技术方法研究、锂资源综合利用研究、磷矿中稀土综合利用研究、铅锌为主的有色金属矿山尾矿稀散金属资源调查技术要求等方面的工作。其中,中国地质科学院国家地质试验测试中心研发的野外现场快速测试离子吸附型稀土元素的方法已申报国家发明专利。

在“管”方面,一方面采用高分辨率遥感技术方法,对不同年份的图像进行处理、解译,不但能够清晰地了解稀土矿山的生产情况而且可以追踪动态变化;另一方面,利用水化学调查方法对江西典型离子吸附型稀土周边水质进行了多年份、分季节

跟踪采样,提出了野外调查(S)—实验测试(M)—特征分析(A)—指标体系构建(I)—模型研究(M)—综合评价(A)的 SMAIMA 工作方法,建立了一套适用于离子吸附型稀土矿区周边开阔河流、矿区支流、沟渠等地表水及矿区周边民用水井、矿山生产井等地下水的采样方法和技术流程,积累了一批可靠的数据,进而研建了基于支持向量机(SVM)的离子吸附型稀土矿山环境效应定量评价模型,提出了 14 个指标并形成评价体系,为离子吸附型稀土矿区周边水质采样、特征分析、水污染源鉴别提供了依据。项目组对 135 个稀土矿区通过 Google Earth 图像、媒体信息搜集和部分矿区现场检查的形式,对每个矿区的生产状况、污染状况、违规开采状况进行了调研分析,统计表明 80%的稀土采矿证之外存在采矿迹象,30%的矿区存在污染或被媒体报道过环境污染。离子吸附型稀土矿的开采对周边水环境造成了一定程度的污染;另外水系中稀土元素的含量明显受汇水区岩性所控制,为离子吸附型稀土矿山环境监测和今后地质找矿提供了科学依据。

当前我国处于经济建设的快速发展时期,高速公路、高速铁路以及各种工业园区等建设工程项目在全国展开,在东南沿海地区“交通网”密度更大。在建设过程出现了对我国重要矿产资源如离子吸附型稀土矿产的压覆情况。根据国土资源部开发司 2012 年 12 月下达的任务,中国地质科学院矿产资源研究所“我国三稀资源战略调查”项目组与中国地质调查局发展研究中心一起,会同相关省区子项目组,对广西、广东、福建三省区 12 个重点工程压覆稀土资源的情况进行了实地调研,采集了大量样品,获得了包括深圳某地在内被压覆离子吸附型稀土资源的实测数据,总结了压覆资源“点多、面广、量大”的特点,建议主管部门一方面要对已实施的工程按照相关法规,扩大稀土资源回收试点,最大限度地回收利用施工过程中压覆的稀土资源,另一方面通过试点工作总结经验,建立长效监管机制,保证离子吸附型稀土资源的可持续健康开发利用。

在“用”方面,三稀项目取得的成果已经产生了较好的示范效应和社会效益。仅 2016 年上半年,应国土资源部地勘司的邀请,项目负责人在找矿突破战略行动西部、北方和南方三个片区研讨会上均作了专题报告,强化了各省对三稀矿产资源在新兴产业发展、促进矿业企业去产能转型升级等方面重要性的认识,部分省份已经开始部署相关的勘查项目。另一方面,通过《稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用》和《国外稀有稀土矿床》两部专著的出版和 60 余篇相关论文的发表以及 13 份阶段性成果专辑(含 156 篇内部文章和《与稀土稀有稀散金属矿

产资源勘查开采管理相关的法规、规章及规范性文件汇编》等3个专辑,共2 027页),社会各界对我国三稀矿产资源家底、开发利用现状及存在问题有了一个较全面、客观的认识,有助于“稀土管得住、稀有找得到、稀散用得对”这一目标的实现。

6 社会经济效益分析

综上所述,三稀项目较好地实现了既定的“国家目标”、“科技目标”、“人才目标”和“管理目标”,取得了丰富的调查研究成果和显著的社会经济效益。

6.1 国家目标

在四川甲基卡矿区外围实现了找矿突破,估算氧化锂334资源量88.55万吨(其中新三号脉占64.31万吨),达超大型规模,使得整个甲基卡矿田的锂辉石型氧化锂资源储量超过200万吨而位居世界同类型矿床前列;通过对福建永定大坪铌钽矿进行地表和深部控制,估算333+334级 Nb_2O_5 资源量为15 719.60 t、 Ta_2O_5 资源量为13 842.63 t,达大型规模,属新发现矿产地。另外还发现一批值得进一步工作的稀有金属远景区和靶区。在赣南,提交离子吸附型重稀土矿产地1处,离子吸附型轻稀土矿产地3处(大、中、小各一处),离子吸附型稀土矿化点10处及找矿靶区27处。

在稀散金属资源方面对多个有色金属矿山中稀散元素的赋存状态和利用现状等进行了评价,为稀散元素的再利用奠定了基础。

省级财政也在加大对三稀矿产资源调查的支持力度,如通过《广东省三稀资源现状和潜力分析》,2015—2025年,广东省拟由省财政设立调查专项资金,统筹安排全省离子型稀土调查评价工作。四川省、云南省、青海省等项目组均获省地勘基金资助。

6.2 科技目标

三稀项目系统总结了风化壳中稀土元素的分布、分配、迁移、富集和分散的基本规律,分别建立了花岗岩、火山岩及变质岩区离子吸附型稀土矿床的成矿模式,并发现离子吸附型稀土矿的母岩体有可能不受岩性、时代、构造背景等的限制(但有利度是不同的),显著地拓展了找矿空间。总结了稀有金属的成矿机制,摸清了稀有稀散金属开发利用现状,总结了部分稀有金属和稀散金属的成矿规律,指出了寻找斑岩型稀有金属矿床等的找矿新方向。

建立了稀土矿山开采动态监测技术方法(获国家发明专利1项),划定了需要监测的预警区域;利用高分辨率遥感影像统计了荒漠化区域的面积,对稀土矿开采周边河流污染程度进行评估(获国家发明专利1项),为环境治理提供了依据。赣南钽获国

家实用新型专利,极大地提高了勘查效果和找矿深度并降低了成本;提出了稀土单元圈矿方法,创新了稀土资源储量动态评价的技术(获软件著作权1项),为合理开发利用稀土资源提供了工具和平台。为了更有效的对我国离子吸附型稀土的资源储量进行动态评价,项目组在赣南某离子吸附型稀土矿勘查过程中,研制开发了克里格法为基础的三维储量估算系统,动态设置边界品位,即根据当时的稀土价格灵活地圈定矿体边界,估算储量,作价格敏感性分析,帮助矿山选择合理的采矿工程布置,保证了矿产资源的合理利用,分析和估算过程形象直观,且计算速度快、精度高,更加符合实际,值得同类型矿床在勘查评价与开发利用时参考。

6.3 人才目标

20世纪50—70年代是我国三稀资源调查、找矿高峰期,期间培养出了的三稀专家如今都已七八十岁高龄,到2011年国家再度重视三稀地质调查工作时,人才断档成为三稀项目遇到的最大难题。在裴荣富院士、白鸽研究员、袁忠信研究员、郑绵平院士、陈毓川院士、赵一鸣研究员、邹天人研究员、杨岳清研究员、徐珏研究员等矿产资源所三稀专家不遗余力的指导下,项目组一方面通过理论上的强化补课,一方面结合野外工作加强技术培训(如2012年3月27—29日,组织各子项目组到赣南离子吸附型稀土矿区实地考察学习,带动了云南等地同类矿床的找矿工作),并编制了统一的技术要求,逐步在全国形成了由33个单位、220余人参加的三稀调查队伍,初步满足了三稀项目的前期需要,但平均每个省不到10人,仍然难以满足需要。为此,项目办组织了十多次内部培训,采取“产学研管用相结合”的方式,不同学科共同参加,取长补短,各显神通,逐步形成了一支有战斗力和凝聚力的三稀资源调查团队,被部领导称为“别动队”。

6.4 管理目标

三稀项目组积极配合国土资源部完成了稀土开采总量指标管理、稀土矿区开采开发情况实地专项调查、工程建设用地压覆稀土情况调查等工作。为中国地质调查局编制了《我国三稀金属资源重点评价部署方案》和《我国三稀矿产资源规划报告》。

三稀项目执行五年,取得了一系列的找矿成果和技术创新,关键在于各级领导、项目负责人、老专家们敢于担当,负有责任心,对工作项目毫无保留地开展培训指导,从矿物鉴定、分析测试到靶区圈定、钻孔选位,真正做到了手把手地教、肩并肩地干。另外摒弃了以往“撒胡椒面”的做法,引入竞争机制,对于态度认真、进展迅速的项目加大资金支持力度,对于找矿进展缓慢的项目适当减少经

费,集中有限经费出大成果。四川省甘孜州甲基卡外围锂辉石的找矿突破,既是野外工作发扬“三光荣”精神艰苦奋斗的结果,更离不开成矿理论的科学决策、项目设置的机动灵活和经费保障的充足有力。

7 下一步工作建议

尽管该项目已于2016年5月4—5日在北京通过了验收,被专家组认为是近年来“最全面、最深入”的一次调查研究,并取得了一系列的创新性成果,实现了从“战略调查→战略侦察→重点评价→找矿突破”的大跨越,但也仍然存在很多值得改进的地方,尤其是一些新发现的矿产地,由于地质调查项目属于公益性,只能“预查”而不能做到勘查程度,导致对新发现矿产地的地质特征、资源潜力和找矿方向难以深入研究,工作程度总体上不高。因此,建议如下:

继续开展甲基卡大型锂矿资源基地的综合地质调查。重点评价C区激电测深圈定出的地下较大规模的异常地质体;对西区电法扫面发现的两条视电阻率的高阻体开展钻探验证工作。同时对甲基卡新三号脉外围开展区域性矿产资源综合调查,而对新三号脉本身宜在适当途径的经费支持下开展普查、详查乃至勘探工作。鉴于甲基卡新三号脉尚未设探矿权和采矿权,新增的64.31万吨资源储量属于完全意义上国家财政经费新增资源储量,自然归属于国家。国家应从当前锂作为21世纪能源金属的现实和长远战略角度出发(路雨祥,2014;王登红等,2016a),科学地制订规划,争取为国家提交一处大型能源金属矿产基地(王登红等,2016b),为用好这一宝贵的战略资源而奠定基础,为“从根本上解决能源问题”提供新的尝试!

继续对华南重点矿集区开展三稀矿产资源的调查评价工作,首先可对湘鄂赣革命老区的幕阜山矿集区以及闽浙赣、南武夷等重点矿集区的重稀土、锂铍铌钽等矿种开展重点调查评价,以点带面;其次是开展华北、东北地区三稀资源的战略调查研究,对2011—2015年间未开展三稀矿产调查的省份补充工作,在摸清资源家底的基础上,面中求点,圈定远景区,优选靶区,进而开展重点评价,为找矿突破提供依据。

加强对“沉积型锂矿”等新类型三稀矿产资源的成矿理论、成矿规律、调查技术和勘查手段的研究,尤其是加强对华北地台铝土矿、太行山煤矿、大兴安岭多金属矿床中共伴生三稀矿产资源的研究和回收利用的实验,有助于现有矿山企业在去产能要求下的“转型升级”。山西、河南等地的铝土矿已

经回收了镓等具有重要意义的稀散金属。

8 结语

综上所述,本项工作在找矿突破、理论方法、人才培养、资源保护等多个方面都取得了重要的成果。但是,这不是终点,而是新的起点,更多的找矿线索值得我们去充分挖掘、更多的理论技术等待我们去深入研究,更多的三稀资源需要我们去保护利用……在国家对三稀资源的需求拉动下,在国土资源部和中国地质调查局的关心支持下,在老一辈专家的精神鼓舞下,我们“三稀人”的脚步不会停止,将通过不断创新,争取在理论、技术、方法和服务等方面拓展调查研究的新领域,为新兴产业的发展作出新贡献。

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、李金发副局长等领导多次听取汇报,傅秉锋所长、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,国土资源部地勘司、开发司、储量司及规划司刘连和、于海峰、许大纯、王昆、姚华军、车长波等部门领导及中国地质调查局总工程师室严光生主任、李基宏副主任、资源评价部陈仁义、薛迎喜、龙宝林和邢树文等各届领导,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三稀项目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、邢树文副所长及陈毓川院士、裴荣富院士、郑绵平院士和邹天人、杨岳清、白鸽、袁忠信、徐珏、侯立玮、丁嘉榆、韩久竹、罗子声等老专家,江西、四川、云南、新疆等各子项目承担单位的领导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. 1212011220804, DD20160055 and DD20160346), and National Natural Science Foundation of China(No. 41402084).

参考文献:

- 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.
- 邓茂春,王登红,曾载淋,张永忠,赵芝,邹新勇,陈斌锋. 2013. 风化壳离子吸附型稀土矿圈矿方法评价[J]. 岩矿测试, 32(5): 803-809.

付小方, 袁藺平, 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.

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, 袁藺平, 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.

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与成矿规律研究[M]. 北京: 原子能出版社.

王登红, 付小方. 2013. 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, 李红阳, 邹天人. 1998. 阿尔泰稀有金属矿床的类型与造山过程[J]. 矿床地质, 17(增刊): 25-28.

王登红, 刘丽君, 刘新星, 赵芝, 何哈哈. 2016a. 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, 36(1): 21-28.

王登红, 王瑞江, 付小方, 孙艳, 王成辉, 郝雪峰, 刘丽君, 潘蒙, 侯江龙, 代晶晶, 田世洪, 于扬. 2016b. 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[J]. 地球学报, 37(4): 471-480.

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, 赵芝, 于扬, 赵汀, 李建康, 代晶晶, 刘新星, 何哈哈. 2013b. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方向[J]. 岩矿测试, 32(5): 796-802.

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.

赵汀, 王登红, 黄文斌, 李晓妹, 郑国栋, 孙艳, 于扬. 2016. 三稀战略调查成果数据库建设与应用[J]. 桂林理工大学学报, 36(1): 36-41.

赵汀, 王登红, 王瑞江, 邓茂春, 陈为光. 2014. 克里格法在离子吸附型稀土矿勘查储量估算中的应用[J]. 岩矿测试, 33(1): 126-133.

References:

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).

DENG Mao-chun, WANG Deng-hong, ZENG Zai-lin, ZHANG Yong-zhong, ZHAO Zhi, ZOU Xin-yong, CHEN Bin-feng. 2013. Evaluation on delineation methods for ion-adsorption type rare earth orebody[J]. Rock and Mineral Analysis, 32(5): 803-810(in Chinese with English abstract).

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).

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.

WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, XU Zhi-gang. 2002. Metallogenic series and regularity of the Altay metallogenic province[M]. Beijing: Atomic Energy Press(in Chinese).

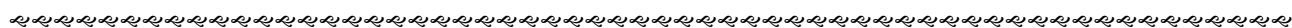
WANG Deng-hong, FU Xiao-fang. 2013b. The lithium prospecting breakthrough in Jiajika periphery, Sichuan[J]. Rock and Mineral Analysis, 32(6): 987(in Chinese).

WANG Deng-hong, LI Hong-yang and ZOU Tian-ren. 1998. The type of rare-metal deposits in Altay and its relation to orogeny[J]. Mineral Deposits, 17(S1): 25-28(in Chinese).

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, 36(1): 21-28(in Chinese with English abstract).

WANG Deng-hong, WANG Rui-jiang, FU Xiao-fang, SUN Yan, WANG Cheng-hui, HAO Xue-feng, LIU Li-jun, PAN Meng, HOU Jiang-long, DAI Jing-jing, TIAN Shi-hong, YU Yang. 2016b. 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[J]. Acta Geoscientia Sinica, 37(4): 471-480(in Chinese with English abstract).

- 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, ZHAO Zhi, YU Yang, ZHAO Ting, LI Jian-kang, DAI Jing-jing, LIU Xin-xing. 2013. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5): 796-802(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 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).
- ZHAO Ting, WANG Deng-hong, HUANG Wen-bin, LI Xiao-mei, ZHENG Guo-dong, SUN Yan, YU Yang. 2016. Construction and application of Rare earth, rare metal and rare-scattered elements minerals resources database[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 36-41(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Ting, WANG Deng-hong, WANG Rui-jiang, DENG Mao-chun, CHEN Wei-guang. 2014. Application of the Kriging method in reserves estimation of the ion-adsorption type rare earth ore[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 33(1): 126-132(in Chinese with English abstract).



国家重点研发计划项目“喀斯特断陷盆地石漠化演变及综合治理技术与示范”获批

National Key Research Planning Program “The Evolution of Karst Fault Basin’s Rocky Desertification, and Its Comprehensive Treatment Techniques and Demonstration” Approved

近日,由中国地质科学院岩溶地质研究所牵头申报的国家重点研发计划项目“喀斯特断陷盆地石漠化演变及综合治理技术与示范”获批,并进入合同修改和签订阶段。

断陷盆地区是石漠化综合治理重要类型区之一,其集中分布在我国的滇东和攀西一带,位于珠江、长江中上游,隶属国家“两屏三带”生态安全屏障的黄土高原—川滇生态屏障,是我国重要的生态保护功能区。目前,断陷盆地石漠化面积约 1.51 万 km²,占喀斯特面积的 32%。

从 2015 年年底起,中国地质科学院岩溶地质研究所组织相关专家多次赴云南等地考察调研,并积极和地方政府沟通洽谈,最终确定以国家石漠化治理工程区的云南蒙自、建水和泸西县作为研究示范区。项目针对断陷盆地盆-山共存的环境地质结构,及水土资源不匹配和石漠化严重等问题,揭示断陷盆地生态环境地质分异及石漠化演变机理,以水土资源高效利用为基础,以生态系统服务功能提升为核心,研发地表、地下水资源联合开发,土壤流失和漏失阻控、植被生态恢复、生态产业开发、水土资源高效利用等技术,形成石漠化生态治理-生态富民耦合调控体系,并进行试验示范。

项目共设置 6 个课题,以联合国教科文组织国际岩溶研究中心、国际泥沙研究培训中心,科技部“岩溶动力系统与全球变化”国际联合研究中心及 3 个国家重点实验室、5 个省部级重点实验室(工程中心)作为支撑平台,组织国土资源部、中国科学院、教育部、水利部、国家林业局等多部门的科研、高校、地方企业和地方政府共 19 家单位共 116 位科技骨干进行跨部门、多学科、产学研联合攻关。项目成果将形成生态恢复-产业转型发展-精准扶贫-生态富民-全面建成小康社会的石漠化区科技支撑链条,为断陷盆地石漠化区资源综合利用提供建议和对策,为断陷盆地石漠化生态恢复和精准扶贫提供技术支撑。