

四川牦牛坪外围龙家沟稀土矿体第一阶段找矿突破及启示^{*}

于 扬¹, 王 伟^{2,3}, 王登红^{1**}, 刘善宝¹, 于 泓¹, 赵 芝¹, 纪德宝³, 金雅楠^{1,2},
阚 磊^{1,2}, 范文辉⁴

(1 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; 2 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 3 四川省地质矿产(集团)有限公司, 四川 成都 610017; 4 四川华行地质设计院有限公司, 四川 西昌 615000)

摘 要 围绕加强国内稀土资源勘探和增储上产的迫切需求, 笔者在综合研究前期地质资料的基础上, 对攀西牦牛坪外围龙家沟开展了以稀土找矿为主的多学科交叉综合调查评价工作。经钻探验证, 龙家沟 ZK001 孔深部发育厚大高品位稀土矿体, 科研指导找矿取得突破性进展。161 件岩芯样品电感耦合等离子体发射光谱分析结果表明: 钻孔 ZK001 总稀土氧化物(TREO)平均含量达 4.87%, 见矿视厚度 125.76 m, 核心部位高品位矿段超过 60%。牦牛坪外围龙家沟厚大隐伏稀土矿体的发现与钻探验证, 扩大了牦牛坪稀土矿外围的成矿前景, 是科技创新指导找矿突破的又一典型实践。随着冕宁-德昌稀土成矿带成矿机制、精准勘查理论技术难题的突破、交叉学科以及模拟技术的应用, 将进一步带动该区稀土找矿工作。今后, 有必要持续开展牦牛坪外围稀土矿产综合地质调查工作, 大幅提升中国第二大稀土资源基地的资源保障能力, 对确保中国稀土资源的绝对优势地位具有重要现实意义。

关键词 稀土矿床; 找矿突破; 关键性矿产资源; 矿产调查工程; 牦牛坪外围; 冕宁-德昌
中图分类号: P618.6 **文献标志码**: A

First stage prospecting breakthrough and revelation of Longjiagou REE orebody in periphery of Maoniuping, Sichuan Province, China

YU Yang¹, WANG Wei^{2,3}, WANG DengHong¹, LIU ShanBao¹, YU Feng¹, ZHAO Zhi¹, JI DeBao³, JIN YaNan^{1,2},
KAN Lei^{1,2} and FAN WenHui⁴

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3 Sichuan Geology and Mineral Resources (Group) Co., Ltd, Chengdu 610017, Sichuan, China; 4 Sichuan Huaxing Geological Design Institute Ltd, Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract

Focusing on the urgent needs of strengthening domestic exploration and increasing reserves and production of rare earth resources, based on the comprehensive study of the preliminary geological data, the project team has carried out a multidisciplinary cross-cutting and comprehensive investigation and evaluation work mainly focusing on rare earth prospecting for the Longjiagou area in the periphery of Maoniuping, west of Sichuan Province.

^{*} 本文得到中国地质调查局“战略新兴产业矿产地质调查工程”(编号:DD20230034)之“四川康定-云南个旧稀有稀土矿产地质调查”项目(编号:DD20230290)和“中国矿产地质志续编与产品服务”项目(编号:DD20221695)共同资助

第一作者简介 于 扬,女,1982年生,副研究员,主要从事三稀矿产资源调查评价研究。Email:yuyang_cags@sina.com

^{**} 通讯作者 王登红,男,1967年生,研究员,主要从事矿产资源研究。Email:wangdenghong@vip.sina.com

After drilling verification, the project team initially encountered a thick rare earth ore body with high-grade REE in Longjiagou, the periphery of Maoniuping. 161 sample conducted by ICP-AES shows the average content of total rare earth oxides (TREO) of ZK001 is 4.87%, and the apparent thickness of the ore is 125.76 m, which is a breakthrough progress in the search for minerals under the guidance of scientific research. The high-grade ore section in the core area exceeds 60%. The discovery and drilling verification of the thick and large concealed rare earth ore body in Longjiagou, the periphery of Maoniuping, is another typical practice of scientific and technological innovation guiding the breakthrough of ore search. With the breakthroughs in the mineralization mechanism of the Mianning-Dechang rare earth mineralization belt, the breakthroughs in the theoretical and technological difficulties of precision exploration, the cross-disciplinary as well as the application of simulation technology, the rare earth mineral search in the area will be further driven by the work of rare earth mineralization in the area. Therefore, it is necessary to continuously carry out the comprehensive geological survey of rare earth ore searching in the periphery of Maoniuping, which will significantly enhance the resource guarantee capacity of China's second-largest rare earth resource base, and is of great practical significance to ensure the absolute dominant position of China's rare earth resources.

Key words: REE deposit, prospecting breakthrough, strategic emerging minerals, mineral exploration emerging, the periphery of Maoniuping, Mianning-Dechang

1 研究背景

稀土是国内外高度敏感的关键金属矿产(王登红等, 2013; 许成等, 2015; 毛景文等, 2019), 在全球科技革命和产业变革中占有重要的战略地位(王登红等, 2017; 翟明国等, 2019)。内蒙古白云鄂博铁铈稀土矿床是中国最大的稀土矿床, 也是世界上已发现的最大的稀土矿床, 目前已进入露天开采的晚期阶段(许立权等, 2016; 李以科等, 2022)。四川省稀土矿产资源保有储量(矿石量)位居全国第2位, 是中国仅次于白云鄂博的第二大稀土产品生产基地, 但作为独立成矿的氟碳铈矿型稀土矿, 则居全国第1位(王瑞江等, 2015), 因此, 其在寻找接替资源、保障中国稀土资源优势地位方面极具潜力。四川省的稀土矿产资源主要分布在冕宁-德昌稀土成矿带(王瑞江等, 2015; 孙明全等, 2017), 迄今为止, 前人对该稀土矿带碳酸岩地质及其矿产(白鸽等, 1985)、矿带内的牦牛坪、大陆槽矿床开展了大量研究并取得了较为丰富的研究成果(蒲广平等, 1988; 陈从德等, 1991; 蒋明全, 1992; 袁忠信等, 1993; 1995; 王登红等, 2002; 侯增谦等, 2008), 但仍存在一些关于稀土成矿理论、勘查方法手段和“卡脖子”关键技术亟待解决(刘丛强等, 2004; 黄小卫等, 2011; 王登红等, 2020; 沈宝根, 2022)。

牦牛坪稀土矿床是近年发现的大型稀土矿床,

在同类矿床中位居世界第三(阳正熙等, 2001)。该矿床原生矿石的矿石类型主要有氟碳铈矿霓辉石萤石重晶石矿型、氟碳铈矿萤石重晶石方解石型、含氟碳铈矿霓辉石微斜长石型3种, 以稀土氧化物总量高、稀土矿物粒度大、易采、易选, 经济效益显著为特征(王登红等, 2002)。近些年国家对稀土实行保护性开采, 地质工作资金投入有限, 牦牛坪稀土矿床外围是否存在隐伏矿体还不清楚, 如何实现接替资源找矿突破, 是支撑实现稀土资源增储首先要解决的问题。

为了查明冕宁-德昌稀土成矿带找矿潜力, 实现牦牛坪外围稀土资源找矿突破, 笔者团队以成矿规律研究为主线, 在深入细致的野外地质工作基础上, 以“稀土找矿”技术创新为突破口, 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, 重点开展牦牛坪矿床外围区域构造与成矿规律研究, 深入总结了厚覆土覆盖区稀土成矿理论和找矿新方法新技术组合, 实现了野外快速分析测试, 促进稀土成矿理论和找矿技术持续创新工作落到实处。通过牦牛坪外围龙家沟稀土矿的找矿实践, 在首个钻孔深部发现了高品位的稀土矿, 其和牦牛坪矿床的稀土矿石类型基本一致, 从而扩大了牦牛坪稀土矿的远景和经济价值, 实现了找矿突破, 指出了下一步找矿方向。研究结果不但丰富了稀土成矿理论体系, 也为保障国家战略性矿产资源安全做出了新贡献。

2 靶区查证与找矿突破

围绕综合研究提出的找矿靶区,笔者团队充分利用“我国三稀资源战略调查”取得的第一手资料及前人资料(李国清等, 2016),结合《中国矿产地质志·稀土矿卷》的研编,针对牦牛坪外围龙家沟开展了地物化综合剖面测量、槽探、钻探验证工作。经多次踏勘,资源所“战略新兴产业矿产地质调查”工程在其下设的“四川康定-云南个旧稀有稀土矿产地质调查”三级项目中部署了靶区查证和钻探验证工作(图1a),四川省地质矿产(集团)有限公司、四川华行地质设计院有限公司协作。目前龙家沟钻孔ZK001已终孔,见矿效果显著(图1b)。

龙家沟首孔ZK001位于牦牛坪稀土矿外围南部,第四系覆盖层较厚,钻孔下钻部位地表见零星稀土转石出露,偶见细脉。经钻探验证,ZK001含稀土矿物—氟碳铈矿的隐伏矿体发现于深度50.63 m处(视厚度),终孔深度351.72 m,钻孔底部仍局部可见板柱状或星点状氟碳铈矿($TREO=0.52\%\sim 1.34\%$, $n=21$)。该孔中矿石的围岩主要是燕山期灰白色中细粒碱长花岗岩、灰白色白云石大理岩、辉长岩和变质

砂岩。依据DZ/T 0204-2022《矿产地质勘查规范·稀土》,ZK001钻孔共圈定工业矿体3层,见矿视厚度为125.76 m,核心部位高品位矿段超过60%,资源潜力非常可观。根据岩芯采样类型划分的基本原则、基本要求、岩芯编录分层情况及间距2 m采样1件的设计采样方案,作者共采集岩芯样品161件。电感耦合等离子体发射光谱分析结果表明,ZK001钻孔总稀土氧化物($TREO$)平均含量为4.87%($n=161$),主要以氟碳铈矿霓辉石重晶石型及氟碳铈矿萤石重晶石方解石型矿石为主(均为含稀土矿物-氟碳铈矿的矿石,图2a~f)。矿石结构主要为中粗粒结构,斑杂构造、团块构造、角砾构造。龙家沟ZK001钻孔样品除含 $TREO$ 外,还富含Pb、Ba、Sr、Th、U、Rb、Zr等稀有金属和有色金属。

3 认识与意义

从目前工作进展来看,尽管关于冕宁-德昌稀土成矿带研究还有一系列科学问题有待进一步深化,牦牛坪外围和深部矿体资源潜力还需要大量的钻探工程来验证,根据目前其外围龙家沟第一阶段稀土找矿工作取得的成果,得出以下几点认识,值得重视:

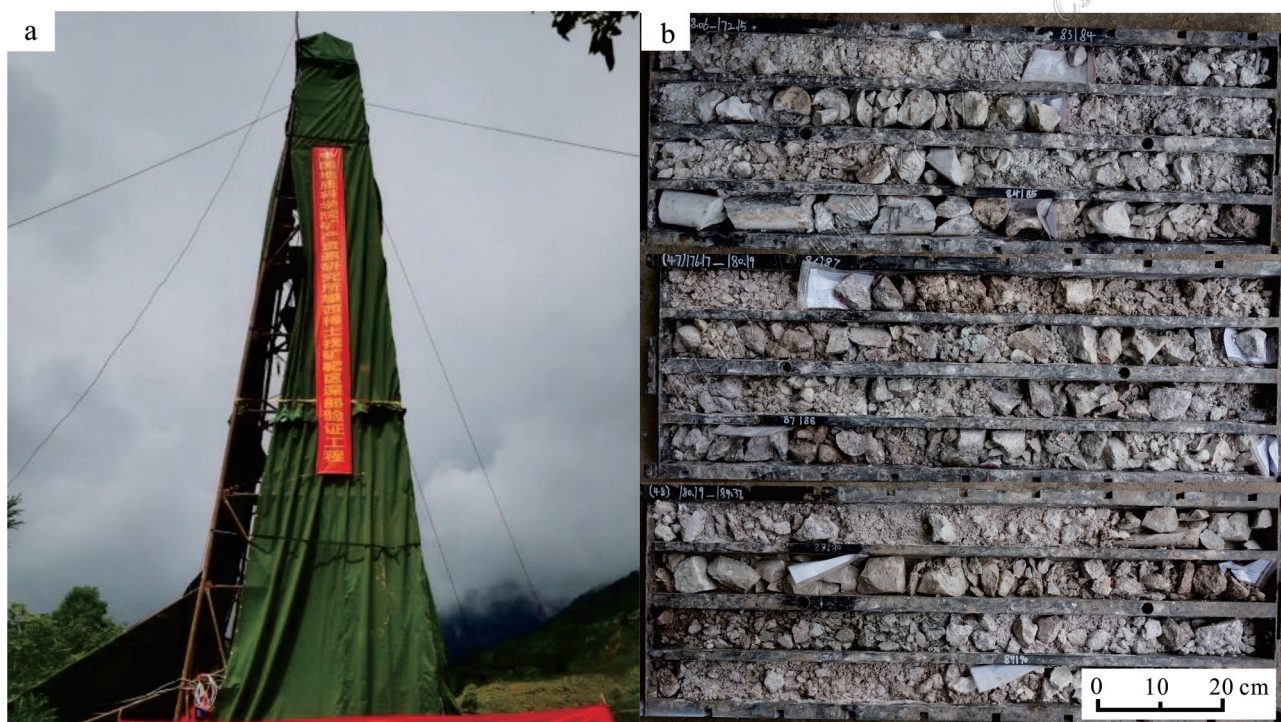


图1 攀西龙家沟钻孔ZK001机台(a)和钻孔ZK001代表性岩芯(b)

Fig.1 Drill machine of borehole ZK001 (a) and its represent core (b) in Panxi Longjiagou

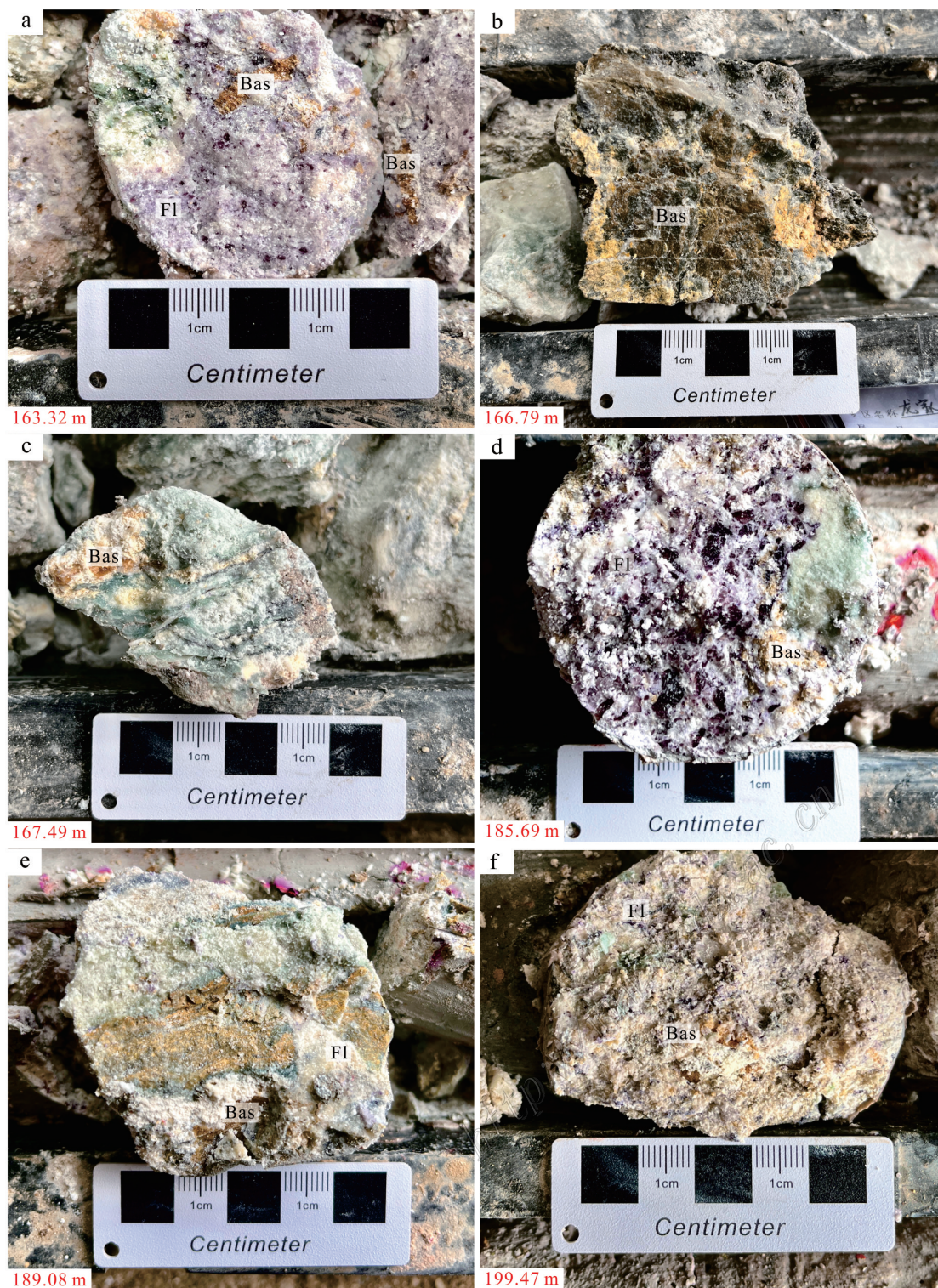


图2 钻孔ZK001不同孔深中含氟碳铈矿的典型岩芯照片

a. 板柱状氟碳铈矿与紫色萤石相间分布;b、c. 板柱状氟碳铈矿呈集合体产出;d、e、f. 板柱状氟碳铈矿与大量萤石共生
Bas—氟碳铈矿;Fl—萤石

Fig.2 Typical core photographs with bastnaesite from different depths of drill hole ZK001

a. Plate-shaped column bastnaesite and purple fluorite are interspersed;b, c. Plate-shaped column bastnaesite occurs as aggregates;d, e, f. Plate-shaped column bastnaesite coexisted with a large amount of purple fluorite
Bas—Bastnaesite; Fl—Fluorite

(1) 冕宁-德昌REE矿带不同稀土矿床之间的成因联系缺乏系统性认识。冕宁-德昌REE矿带作为中国最重要的稀土成矿带之一,成矿地质条件复杂,成矿多期次。区内单个矿床研究及勘探程度相对较高,但对于矿床成因的认识还不统一,需要加大地质研究力度,完善找矿标志。牦牛坪稀土矿床与霓石英正长岩-碳酸岩杂岩体密切相关,稀土矿化与地幔过程存在成因联系(袁忠信等,1995)。研究证实,杂岩体中的碳酸岩是典型的岩浆碳酸岩,是地幔过程的产物(王登红等,2002)。南段碳酸岩-碱性杂岩体受大陆槽走滑断裂的控制,伴随多期次岩浆活动,形成多期次、成矿多阶段的大陆槽式REE矿床,但对与稀土矿化有关的正长岩与碳酸岩的成因联系缺乏系统地研究,尚未对多期岩浆活动的成矿意义进行全面地总结,对冕宁-德昌稀土成矿带南段有利于成矿的地质条件、成矿流体组成、成矿物质来源以及碳酸岩-正长岩岩浆活动与稀土成矿的内在联系的研究和理解较为薄弱,对冕宁-德昌REE矿带不同稀土矿床之间的成因联系也缺乏系统性认识。

(2) 制约冕宁-德昌REE矿带稀土找矿突破的成矿规律研究有待深化。本次牦牛坪外围南部龙家沟隐伏厚大稀土矿体的发现,对于牦牛坪外围稀土找矿靶区的圈定具有现实指导意义。笔者团队在牦牛坪外围龙家沟ZK001孔发现的稀土矿石主要是氟碳铈矿-霓辉石-重晶石型和氟碳铈矿-萤石-重晶石-方解石型,和牦牛坪矿床的稀土矿石类型基本一致,从而扩大了牦牛坪稀土矿的远景和经济价值,但目前对于冕宁-德昌稀土成矿带区域尺度的成矿规律,尤其是牦牛坪、大陆槽深部及外围找矿空间的重视程度不足。从基础地质、蚀变特征到矿化样式、矿体深部赋存形式以及成矿机制的研究都有待深化,对已知矿体深部、外围稀土资源的评价也较为匮乏。要解决这些问题,需要紧密结合深入细致的野外地质工作,配合精准高效定位的深部探测手段,创新技术方法组合,深化成矿规律研究,厘清冕宁-德昌稀土成矿带南段成矿有利区域的控矿关键要素。该项工作的开展,对于快速圈定新的稀土成矿有利区、典型矿床深部靶区的快速验证,甚至助推冕宁-德昌稀土成矿带成为国家级大型稀土资源基地都具有非常重要的意义。

(3) 亟待建立针对稀土矿体深部赋存状况解剖及精准定位的高效勘探技术方法体系。目前对于冕宁-德昌稀土成矿带的找矿线索主要来自于传统的

地质填图和地表踏勘。近年来项目组依托地质调查项目,通过大比例尺地质测量、伽玛能谱剖面测量以及地球化学测量方法手段发现了若干条矿化明显的脉体,含矿层厚,品位高,证实找矿前景很好,但工作深度不够。目前对于稀土在不同矿体和层位的分异规律缺乏系统地研究,特别是对于冕宁-德昌稀土成矿带南段槽上西侧若干条矿化明显的脉体缺乏深部探测手段的验证,导致成矿有利区成矿、控矿因素研究程度不足,对稀土资源的评价程度也不够。下一步研究重点应结合野外工作实践,建立稀土矿体深部赋存状况及精准定位的高效勘探技术方法体系,如用于矿体精准定位的可控源音频大地电磁测深、微纳米颗粒物深部气溶胶探测、雷达精准定位、无人机电大比例尺航磁测量及三维建模等技术方法体系,结合成矿规律研究,形成有针对性的高效勘探技术方法体系,解决稀土金属富集的深部找矿空间问题。

(4) 应加大经费投入,对已发现有较好的矿化线索、成矿潜力大的地区亟待开展深部工程验证。项目组自2011年以来已在攀西地区发现了多处矿化明显、含矿层厚大、找矿前景较好的可供进一步勘查的重点工作区。目前受限于勘查经费投入,缺少深部验证手段,难以将成果固化,找矿突破难度大。例如,对攀西槽上-营盘山工作区西南段发现的3条规模较大的含氟碳铈矿萤石重晶石矿(化)体尚未开展钻探验证,对于项目组前期在攀西槽上-营盘山工作区西南段发现的若干条脉体,经ZK3701、ZK3702、ZK3703钻探控制新发现3个矿体的深部延伸、空间形态等地质特征尚未厘清。下一步应对已发现较好矿化线索、矿化明显、成矿潜力大的地区亟待开展工程验证,建议加大经费投入,扩大找矿成果。

致谢 野外工作期间得到中稀集团胡谷华、娄战荒、徐建新、李小军、李桂明、何斌等领导的指导;测试中心屈文俊、樊兴涛、张磊、贾静等专家野外快速分析方面的帮助;蒲广平、徐争启、赵支刚、刘图强、谢恩顺、邓江红、杨岳清、黄永皇等专家的有益交流和辛苦付出,在此一并感谢。

References

- Bai G and Yuan Z X. 1985. Carbonate rock geology and its minerals[J]. Journal of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, (1): 1-195(in Chinese).

- Chen C D and Pu G P. 1991. Geological features and genesis of the Maoniuping rare earth element deposit, Sichuan[J]. *Geology and Exploration*, (5): 18-23(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Tian S H, Xie Y L, Yuan Z X, Yang Z S, Yin S P, Fei H C, Zou T R, Li X Y and Yang Z M. 2008. Mianning-Dechang Himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in eastern Indo-Asian collision zone, Southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model[J]. *Mineral Deposits*, 27 (2): 145-176(in Chinese with English abstract).
- Huang X W, Zhang Y Q and Li H W. 2011. Development trend and research progress of rare earth extraction in China[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 25(3): 134-137(in Chinese with English abstract).
- Jiang M Q. 1992. The geological and structural feature of the Maoniuping REE deposit and its ore-controlling significance[J]. *Mineral Deposits*, 11(4): 351-358(in Chinese with English abstract).
- Li G Q, Zhao Y X and Huang Y H. 2016. Geological characteristics and metallogenic mechanism of the Puwugou rare earth deposit in Mianning[J]. *The Earth*, (1): 64-65(in Chinese).
- Li Y K, Ke C H, Wang D H, Zhao Y G, She H Q, Li R P, Hao M Z, Wang A J, Deng Z, Gao Y P, Zhang Q, Zhang L, Li J W, Hu G Y, Liu Yun, Guo B and Yuan X Y. 2022. Important progress in prospecting and exploration of iron ore in deep border area of Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Mineral Deposits*, 41(1): 202-206(in Chinese with English abstract).
- Liu C Q, Hang Z L, Xu C, Zhang H X, Su G L, Li H P and Qi L. 2004. Geofluids in the Earth's mantle and its role in mineralization: A case study the Mianning REE deposit, Sichuan Province, China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-229(in Chinese).
- Mao J W, Yuan S D, Xie G Q, Song S W, Zhou Q, Gao Y B, Liu X, Fu X F, Cao J, Zeng Z L, Li T G and Fan X Y. 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st Century[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 935-969(in Chinese with English abstract).
- Pu G P. 1988. Discovery of an alkali pegmatite-carbonate complex zone in Maoniuping, southwestern Sichuan Province[J]. *Geological Review*, 34 (1): 88-92(in Chinese with English abstract).
- Shen B G. 2022. Strengthen research on rare earth strategies and actively promote the contribution of China's rare earth industry to global sustainable development[J]. *Science & Technology Review*, 40 (8): 1-2(in Chinese).
- Sun M Q, Luo Q B, Zhang B F, Fan Y, Yang L, Deng T, Zhang W H and Gong Y. 2017. Rare earth mineralization patterns and resource evaluation in Sichuan Province[M]. Beijing: Science Press. 1-110(in Chinese).
- Wang D H, Yang J M, Yan S H, Chen Y C and Xu J. 2002. Dynamics of the REE mineralization in Maoniuping area, Sichuan Province: Isotopic geochemistry of carbonatites[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(5): 539-544(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Zhao Z, Yu Y, Zhao T, Li J K, Dai J J, Liu X X and He H H. 2013. Progress, problems and research orientation of ion-absorption type rare earth resources[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5): 796-802(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Zhao Z, Yu Y, Wang C H, Dai J J, Sun Y, Zhao T, Li J K, Huang F, Chen Z Y, Zeng Z L, Deng M C, Zou X Y, Huang H G, Zhou H and Feng W J. 2017. A Review of the achievements in the survey and study of ion-absorption type REE deposits in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38 (3): 317-325(in Chinese with English abstract).
- Wang D H. 2020. Exploring the development path of China's three rare minerals in the Era of global strategic emerging resources[J]. *Scientific and Cultural Popularization of Natural Resources*, (1): 4-11(in Chinese).
- Wang R J, Wang D H, Li J K, Sun Y and Li D X. 2015. Rare elements, rare earth and dispersed elements resources and their development and utilization[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-429(in Chinese).
- Xu C, Song W L, He C and Wang L Z. 2015. The overview of the distribution, type and genesis of the exogenetic rare earth elements (REE) deposits[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(2): 234-241(in Chinese with English abstract).
- Xu L Q, Zhang T, Zhang M, Zhang Y Q, Zhang Y Q, Kang X L, Xu Zhan and Han Z Q. 2017. Mineralization rules of important mineral areas in Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1-385(in Chinese).
- Yang Z X, Williams Jones A E and Pu G P. 2001. A fluid inclusion study of Maoniuping REE deposit, Sichuan, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 21(2): 26-33(in Chinese with English abstract).
- Yuan Z X, Bai G and Ding X S. 1993. U-Pb isotopic age of zircon from the Maoniuping alkali granite, Sichuan Province and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 12(2): 189-192(in Chinese with English abstract).
- Yuan Z X, Shi Z M, Bai G, et al. 1995. Maoniuping rare earth elements deposit in Mianning, Sichuan[M]. Beijing: Seismological Press. 1-150(in Chinese).
- Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, Jiang S Y, Li W C, Wang R C, Wang D H, Qi T, Qin K Z and Wen H J. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33 (2): 106-111(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白鸽, 袁忠信. 1985. 碳酸岩地质及其矿产[J]. *中国地质科学院矿床所刊*, (1): 1-195.
- 陈从德, 蒲广平. 1991. 牦牛坪稀土矿床地质特征及其成因初探[J]. *地质与勘探*, (5): 18-23.
- 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 袁忠信, 杨竹森, 尹淑苹, 费红彩, 邹天人, 李小渝, 杨志明. 2008. 川西冕宁-德昌喜马拉雅期稀土元素成

- 矿带:矿床地质特征与区域成矿模型[J]. 矿床地质, 27(2): 145-176.
- 黄小卫, 张永奇, 李红卫. 2011. 中国稀土资源的开发利用现状与发展趋势[J]. 中国科学基金, 25(3):134-137.
- 蒋明全. 1992. 牦牛坪稀土矿床构造特征及其控矿意义[J]. 矿床地质, 11(4): 351-358.
- 李国清, 赵玉祥, 黄永皇. 2016. 冕宁普格沟稀土矿床地质特征及成矿机制浅析[J]. 地球, (1):64-65.
- 李以科, 柯昌辉, 王登红, 赵永岗, 余宏全, 李瑞萍, 郝美珍, 王安建, 邓震, 高玉璞, 张强, 张丽, 李进文, 胡古月, 刘云, 郭宾, 苑星宇. 2022. 白云鄂博矿区深部铁矿床勘查突破及启示[J]. 矿床地质, 41(1):202-206.
- 刘丛强, 黄智龙, 许成, 张鸿翔, 苏根利, 李和平, 漆亮. 2004. 地幔流体及其成矿作用: 以四川冕宁稀土矿床为例[M]. 北京:地质出版社. 1-218.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 宋世伟, 周琦, 高永宝, 刘翔, 付小方, 曹晶, 曾载淋, 李通国, 樊锡银. 2019. 21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 38(5):935-969.
- 蒲广平. 1988. 四川西南牦牛坪碱性伟晶岩-火成岩碳酸岩杂岩体的发现[J]. 地质论评, 34(1): 88-92.
- 沈保根. 2022. 加强稀土战略研究, 主动宣传中国稀土产业对全球可持续发展的贡献[J]. 科技导报, 40(8):1-2.
- 孙明全, 罗其标, 张博飞, 等. 2017. 四川省稀土成矿规律及资源评价[M]. 北京: 科学出版社. 1-110.
- 王登红, 杨建民, 闫升好, 陈毓川, 徐珏. 2002. 四川牦牛坪碳酸岩的同位素地球化学及其成矿动力学[J]. 成都理工学院学报, 29(5): 539-544.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 王成辉, 代晶晶, 孙艳, 赵汀, 李建康, 黄凡, 陈振宇, 曾载淋, 邓茂春, 邹新勇, 黄华谷, 周辉, 冯文杰. 2017. 中国离子吸附型稀土矿产科学研究和调查评价新进展[J]. 地球学报, 38(3):317-325.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 赵汀, 李建康, 代晶晶, 刘新星, 何晗晗. 2013. 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. 2020. 面向全球战略新兴资源时代 探寻中国三稀矿产发展之路[J]. 国土资源科普与文化, (1): 4-11.
- 王瑞江, 王登红, 李建康, 孙艳, 李德先. 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, 34(2):234-241.
- 许成, 宋文磊, 何晨, 王丽泽. 2015. 外生稀土矿床的分布、类型和成因概述[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(2):234-241.
- 许立权, 张彤, 张明, 张玉清, 张永清, 康小龙, 许展, 韩宗庆. 2017. 内蒙古自治区重要矿产区域成矿规律[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 1-385.
- 阳正熙, Williams Jones A E, 蒲广平. 2001. 四川牦牛坪稀土矿床矿物流体包裹体研究[J]. 矿物岩石, 21(2):26-33.
- 袁忠信, 白鸽, 丁孝石. 1993. 四川冕宁牦牛坪碱性花岗岩锆石铀-铅同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 12(2): 189-192.
- 袁忠信, 施泽民, 白鸽, 等. 1995. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床[M]. 北京: 地震出版社. 1-150.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源:现状与问题[J]. 中国科学基金, 33(2):106-111.