

云南红河州超大规模离子吸附型稀土矿的发现及其意义

王学求, 周 建, 张必敏, 刘东盛, 徐善法, 王 玮, 王 强, 乔 宇,
谢明君, 刘福田, 迟清华, 刘昱恒, 胡庆海, 严桃桃, 李瑞红, 田 密,
吴 慧, 刘汉粮, 柳青青

自然资源部地球化学探测重点实验室, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000;
联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北廊坊 065000

摘 要: 围绕国家战略性新兴产业对稀土资源的需求, 特别是紧缺的重稀土资源, 如何快速有效地发现富含重稀土矿床找矿靶区是勘查地球化学急需解决的问题。“化学地球”大科学计划获得全国地球化学基准数据, 圈定稀土异常超常富集区 9 处, 其中新发现的滇南红河州蒙自一中越边境地区稀土富集区轻重稀土比值(LREE/HREE)为 3.5, 与华南富含重稀土的离子吸附型稀土矿异常 LREE/HREE 比值一致。结合地质背景、成矿母岩、气候和地形地貌特点等初步判断具有寻找类似华南富含重稀土的离子吸附型稀土矿资源潜力。因此, 对这一异常的核心区, 开展了 1:25 万、1:5 万地球化学调查和风化剖面测量, 并经 29 个钻孔验证, 初步发现马鞍底潜在超大型富含重稀土离子吸附型稀土矿。富矿区分布于坡度较缓的坡脚处, 风化母岩为印支期和燕山期花岗岩、元古界斜长片麻岩和变粒岩。风化剖面厚度最深可达 25 m 左右, 富矿层位于全风化层, 一般在 2~13 m 深度, 矿体平均厚度 6~13 m, 最厚可达 21 m, 平均品位 0.14%。根据 29 个钻孔和 84 个风化壳剖面测量, 初步估算稀土潜在矿石量约 9.46 亿吨、稀土氧化物潜在资源约 100 万吨。这是我国首次在滇南地区发现潜在超大型离子吸附型稀土矿。该离子吸附型稀土矿同时富含轻稀土(镧、铈、镨、钕)和重稀土(钐、铽、镱、铟), 具有重大经济价值和科学意义。这一发现表明开展从极低密度、低密度到高密度地球化学调查, 获得全部 16 个稀土元素高质量数据是发现离子吸附型稀土矿的快速有效方法。

关键词: 离子吸附型稀土矿; 重稀土; 地球化学勘查; 化学地球; 发现; 马鞍底; 云南红河州

中图分类号: P577 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.053002

Finding and Implication of an Undiscovered Giant Deposit of Ion-adsorption Rare Earth Elements in Honghe, South Yunnan, China

WANG Xue-qiu, ZHOU Jian, ZHANG Bi-min, LIU Dong-sheng, XU Shan-fa, WANG Wei, WANG Qiang,
QIAO Yu, XIE Ming-jun, LIU Fu-tian, CHI Qing-hua, LIU Yu-heng, HU Qing-hai, YAN Tao-tao,
LI Rui-hong, TIAN Mi, WU Hui, LIU Han-liang, LIU Qing-qing

Key Laboratory of Geochemical Exploration, Ministry of Natural Resources,
Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000;
UNESCO International Centre on Global-scale Geochemistry, Langfang, Hebei 065000

Abstract: Rare earth elements (REEs), particularly heavy rare earth elements (HREE), are critically needed by high-tech industries and modern society. Geochemical methods are used in the exploration and delineation of the

本文由中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190451)、国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600600)和深部探测专项(编号: Sinoprobe-04)联合资助。

收稿日期: 2022-04-26; 改回日期: 2022-05-28; 网络首发日期: 2022-06-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王学求, 男, 1963 年生。研究员。从事勘查地球化学研究。通讯地址: 065000, 河北省廊坊市广阳区金光道 84 号。

E-mail: wxueqiu@mail.cgs.gov.cn。

targets of HREE-enriched deposits. A total of 9 REE-enriched geochemical provinces were delineated throughout China by Mapping Chemical Earth Program-China Geochemical Baselines project. The targets with 3.5 of LREE/HREE, similar to the ion-adsorption HREE-enriched deposits discovered in Huanan, located in Honghe, Yunnan province, southwestern China, were selected for follow-up geochemical surveys at scales of 1:250 000 and 1:50 000. A giant ion-adsorbed REE deposit with an ore reserve of 946 million tones and TRE_2O_3 reserve of approximately 1.0 million tones at an average REE grade of 0.14% has been discovered by a drilling program at Maandi, Honghe. The ore bodies hosted in regolith range in depth from 2 m to 13 m, which developed from the parent rocks of Indosinian and Yanshanian granites and Proterozoic gneiss and leptynite, and are distributed at gentle slope areas. This is the first discovery of ion-adsorption REE deposits containing LREE (La, Ce, Pr and Nd) and HREE (Gd, Tb, Dy and Y) with both economic and scientific value in south Yunan, China. This finding shows that global-, regional- to local-scale geochemical surveys by using wide-spaced, low-density and high-density sampling to provide high-quality data of 16 rare earth elements is a cost-effective method to delineate targets for regolith-hosted ion-adsorption HREE deposits.

Key words: ion-adsorption deposit; HREE; geochemical survey; Mapping Chemical Earth; discovery; Maandi; Honghe of Yunnan

稀土(REE)是我国,也是国际上公认的战略资源或关键资源(European Commission, 2014; U. S. Geological Survey, 2017),尤其近年新能源和高科技产品对重稀土(HREE)需求的显著增长,保障重稀土资源需求具有更为重要的战略意义。重稀土主要来源于风化壳离子吸附型稀土矿床,资源储量占全球总储量的80%以上(池汝安和刘雪梅,2019)。该类型稀土矿床主要分布于我国华南地区,很多学者对其矿床特征和成因进行了大量研究(王登红等,2013; Li et al., 2019; 李余华等, 2019; 毛景文等, 2019; 王登红, 2019; 陆蕾等, 2020; 周美夫等, 2020; 明添学等, 2021)。王学求等(2020)从全国地球化学基准数据得出岩石和土壤(风化物)轻重稀土比值均为3.5,即地壳中轻稀土(LREE)丰度是重稀土的3.5倍。表明重稀土相对轻稀土而言,更为稀少。如何快速有效地发现异常,并判断富含重稀土矿床的找矿靶区是勘查地球化学急需解决的问题。20世纪70年代末期开始的“区域化探全国扫面计划”分析了39个元素,仅包含镧和铈两个稀土元素(谢学锦, 1978),限于当时稀土元素测试技术落后,给出的稀土异常信息价值有限。2008年开始实施的“全国地球化学基准计划”分析了81个指标(王学求等, 2011, 2016; 王学求, 2012; Wang, 2015; Wang et al., 2020),使用ICP-MS分析了全部16个稀土元素(张勤等, 2012),获得全国高质量稀土元素数据,在全国共圈定稀土异常35处,新发现稀土超常富集区9处(王学求等, 2020)。其中在云南红河州的中越边界地区圈定的稀土异常,轻重稀土比值(LREE/HREE)与华南稀土异常LREE/HREE最为接近,因此选择该区开展1:25万、1:5万和风华剖面地球化学勘查,并经钻探验证在马鞍底发现潜在超大型离子吸附型稀土矿。本文对这一发现过程、使用的方法技术和钻

探验证结果进行介绍,并对发现的意义进行简要讨论。后续文章将对方法技术和矿体特征进行专门阐述。

1 发现历程与方法技术

1.1 云南红河州稀土元素超常富集区的发现

2008—2014年,深部探测与实验专项(董树文和李廷栋, 2009)的“中国地球化学基准与综合研究”项目(简称CGB计划)(王学求, 2012; 王学求等, 2011, 2016; Wang, 2015)利用汇水域沉积物采样,获得全国81个指标(含76个化学元素)地球化学基准值。2016年开始实施的“化学地球”大科学计划(Wang et al., 2020),对地球化学数据进行研究分析,采用累积频率85%做异常下限,在全国共圈定稀土元素地球化学异常区35处(王学求等, 2020)。异常总体特点是南高北低,连片大规模异常主要分布于华南造山带、松潘—甘孜造山带和冈底斯—三江造山带,北方除白云鄂博以外,其它异常相对较弱。26个异常与已知稀土矿或稀土成矿带相吻合,已知大型以上稀土矿都存在累积频率大于95%的强异常富集中心。异常含量值一般是地壳丰度2倍以上(富集系数大于2),异常规模达到地球化学省以上(一般面积大于1000 km²),把这种具有强富集中心的多层套合结构地球化学异常称作超常富集区。新发现超常富集区9处(王学求等, 2020)。云南红河稀土超常富集区,在累积频率95%圈定的浓集中心范围内,稀土总量平均值353 μg/g,是全国背景(173 μg/g)的2倍;轻稀土平均值257 μg/g,是全国背景(134 μg/g)的1.9倍;重稀土平均值65 μg/g,是全国背景(37 μg/g)的1.8倍。这是在滇南首次发现稀土超常富集区,在以往的文献中均未见报道(袁忠信和白鸽, 2001; 袁忠信等, 2012; 陈毓川等, 2015;

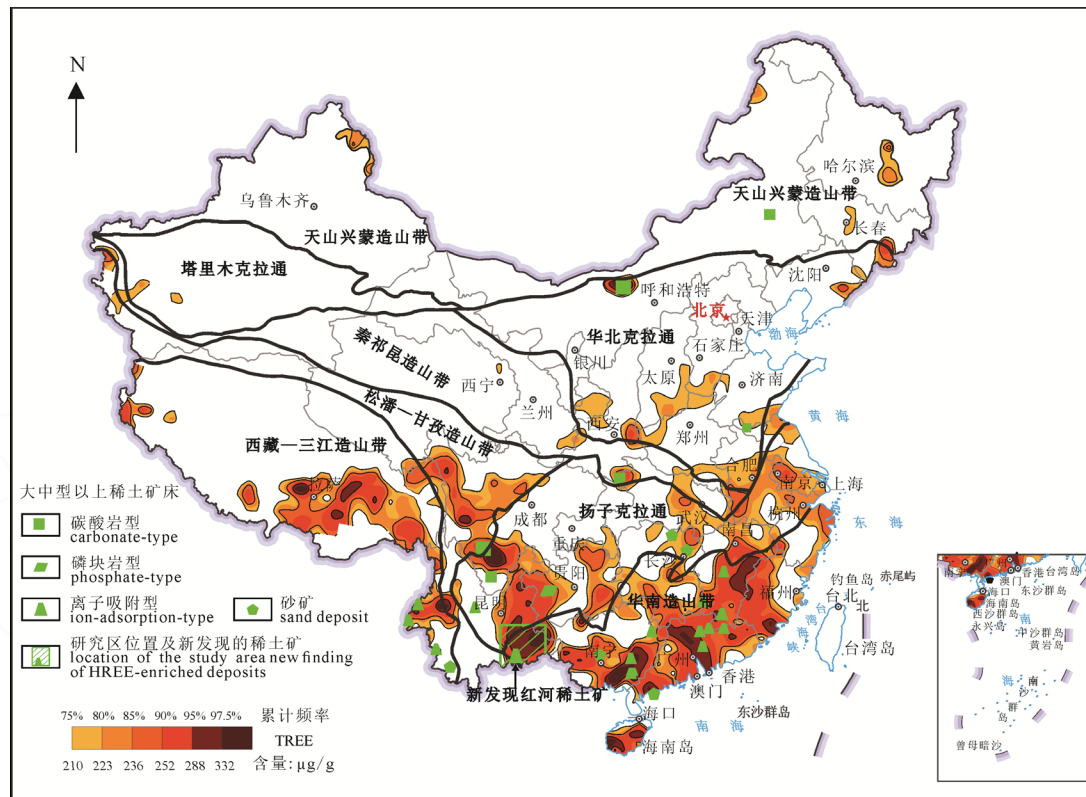


图1 全国稀土超常富集区与新发现云南红河州稀土矿位置

Fig. 1 Geochemical provinces of super-enriched REEs in China and location of new finding of HREE-enriched deposits at the study area of Honghe, Yunnan, China

Xie, 2016; 李童斐等, 2018; 明添学等, 2021)。

根据全国已知典型轻稀土矿地球化学异常轻、重稀土含量和比值研究, 得出水系沉积物或风化物土壤中轻稀土矿 $LREE/HREE > 5$, 如内蒙古白云鄂博和四川牦牛坪碳酸岩-碱性岩超大型轻稀土矿异常 $LREE/HREE$ 比值分别为 5.8 和 6.7, 而华南富含重稀土的离子吸附型稀土矿 $LREE/HREE$ 为 3.5。新发现的云南红河异常 $LREE/HREE$ 比值为 3.2, 与华南异常轻重稀土比值一致, 这一特点非常有利于寻找富含重稀土的离子吸附型稀土矿。在越南一侧已经发现 Dong Pao 离子吸附型稀土矿 (Chau et al., 2017)。该稀土异常富集区位于华南造山带、松潘甘孜造山带和扬子克拉通交界区 (图 1), 燕山期、印支期正长花岗岩和元古界哀牢山群花岗质片麻岩沿红河、中越边境地区广泛出露, 气候温暖潮湿, 生物作用强烈, 发育厚达 20 余 m 风化壳, 且异常重稀土比例较高, 接近江西西洞和广西陆川富含重稀土矿异常轻重稀土比值 3.5, 初步判断具有寻找富含重稀土离子吸附型稀土矿潜力。

1.2 1:25 万地球化学调查

基于上述研究结果, 2019 年在地质调查计划支持下, 实施“化学地球”大科学计划, 开展“一带一路”关键资源地球化学调查, 选择云南红河州中越毗邻区的异常核心区约 6000 km², 开展 1:25 万稀

土资源地球化学调查, 采样密度为 1 个样/4 km²。

在调查区范围内共圈定 13 处稀土异常。结合成矿母岩分布、地形地貌特点和风化壳发育程度, 初步判断红河 I 号、红河 II 号、红河 III 号、红河 IV 号、红河 V 号异常最有可能形成离子吸附型稀土矿 (图 2)。表 1 给出了异常的各种地球化学参数。限于篇幅仅对红河 I 号异常进行描述。红河 I 号异常位于马鞍底乡, 向南延伸至中-越边境, 呈未封闭状态。异常区内 34 件样品 TREE 含量平均值为 585 µg/g, 最高值单点达到 1523 µg/g; LREE 平均 474 µg/g, 最高值 1438 µg/g; HREE 平均 111 µg/g, 最高值 345 µg/g。轻重稀土平均值之比 4.27。异常区内还伴生强烈的 Zr、Nb、Ta 等异常。

该异常位于华南板块与印支板块之间的哀牢山—红河断裂南段, 沿红河断裂两侧分布, 可一直延伸到越南境内。异常区内岩性主要有印支期和燕山期正长花岗岩, 元古界哀牢山群斜长片麻岩、变粒岩、二云片岩、黑云片岩、云母石英片岩等, 沿断裂带小面积分布的二辉橄榄岩 (图 3)。稀土核心区异常分布与印支期正长花岗岩和元古界哀牢山群花岗质钾长片麻岩、变粒岩密切相关。

1.3 1:5 万地球化学调查

2020 年, 国家重点研发计划“穿透性地球化学勘查技术”项目资助下, 针对红河 I 号异常、红河

II号异常和红河III号异常开展1:5万稀土元素地球化学调查。按照500 m×500 m网格布置采样点位,局部交通困难地区适当放稀。

图4是红河I号马鞍底异常的1:5万稀土总量地球化学点位图。异常区共采集细粒级水系沉积物样品654件,稀土总量为55.2~6525 μg/g,平均值421 μg/g。轻稀土含量范围47.8~6412 μg/g,平均值349 μg/g;重稀土含量范围7.2~302 μg/g,平均值

71.8。轻重稀土比为4.8。细粒级水系沉积物样品稀土总量大于450 μg/g的边界品位有213个,大于1000 μg/g的有21个,富集轻稀土和重稀土。

2 风化壳剖面测量与钻探验证

2.1 风化壳剖面异常查证

针对离子吸附型稀土矿位于基岩上方风化壳中的特点,首先利用河流切割和地形落差出露的风

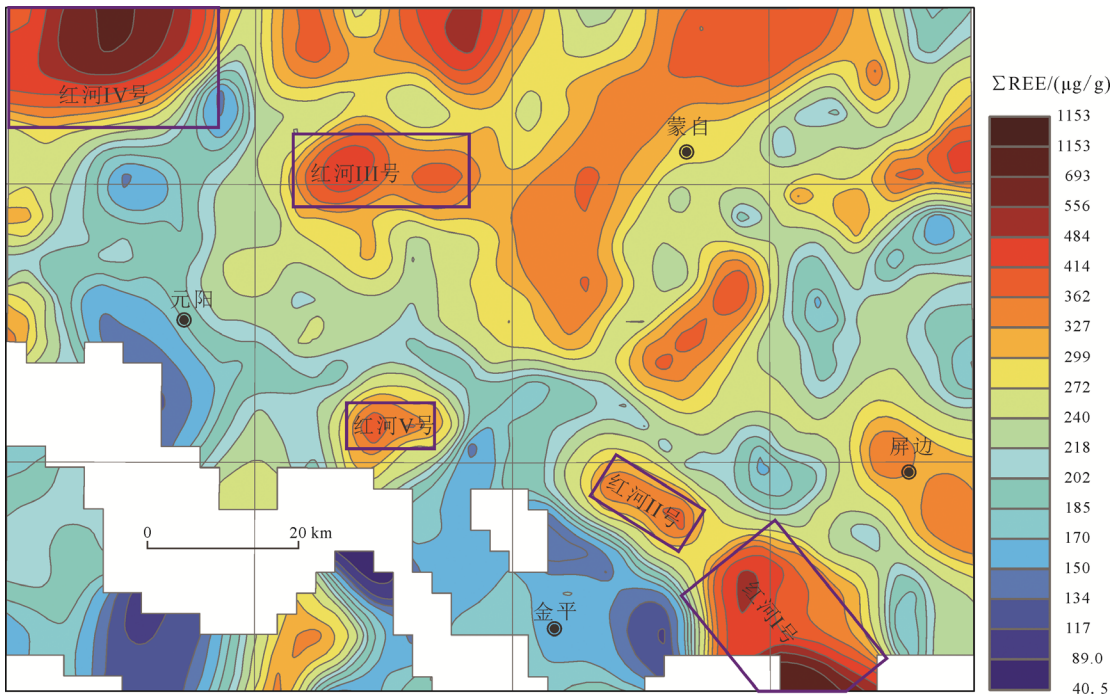


图2 云南省红河州1:25万稀土地球化学图及主要异常编号
Fig. 2 REE geochemical map with anomalies delineated by 1:250 000 geochemical survey at Honghe, Yunnan

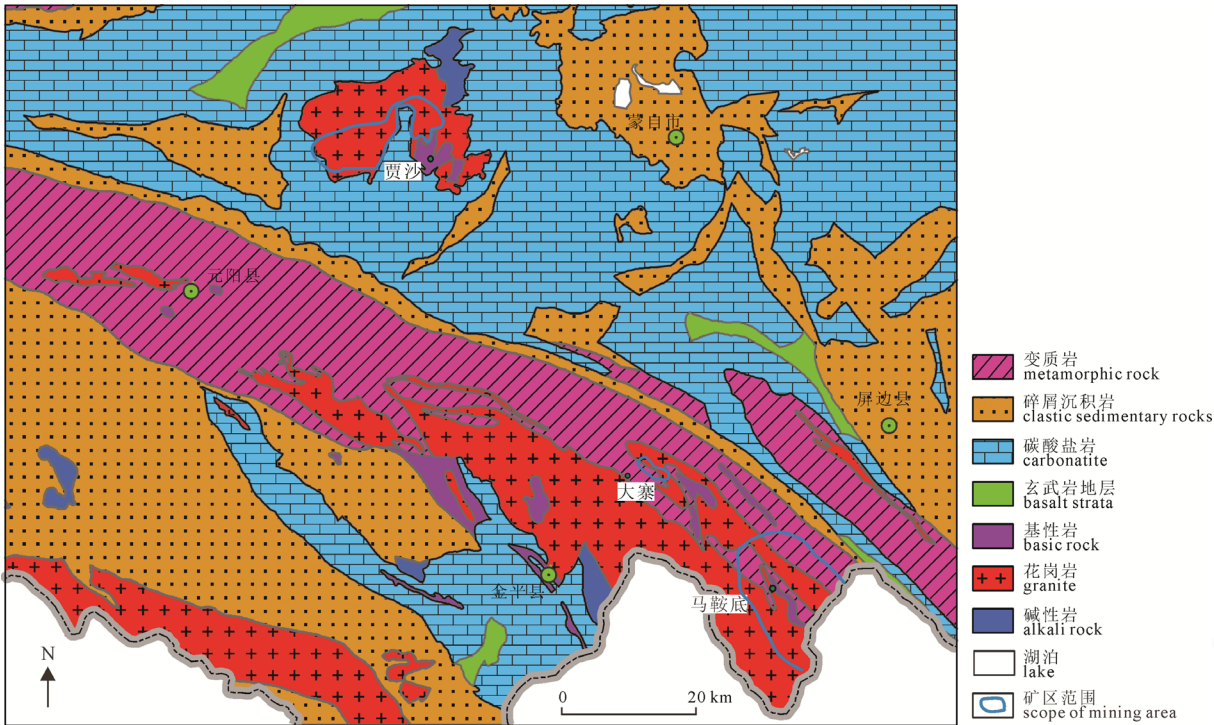


图3 工作区地质图与矿区位置
Fig. 3 Geological map with geochemical anomalies at Honghe, Yunnan

表 1 红河工区 1:25 万地球化学调查稀土元素异常参数统计表(μg/g)

Table 1 Statistical parameters of REE geochemical anomalies delineated by 1:250 000 geochemical survey at Honghe, Yunnan

异常编号	面积/km ²	异常点数量	ΣREE		HREE		LREE		稀土元素组合	母岩
			平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值		
I	237	56	586	1523	103	266	483	1438	La, Ce, Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Y	印支期花岗岩和哀牢山群变质岩
II	13	3	530	606	77	96	452	510	La, Ce, Pr, Nd	同上
III	19	4	532	823	60	122	472	760	La, Ce, Pr, Nd	燕山期花岗岩
IV	47	14	649	1315	82	164	566	1151	La, Ce, Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Y	砂岩、泥岩、灰岩、印支期花岗岩
V	138	19	555	926	169	345	386	581	La, Ce, Pr, Nd	印支期花岗岩和哀牢山群变质岩
总计	454	96	585	1523	111	345	474	1438		

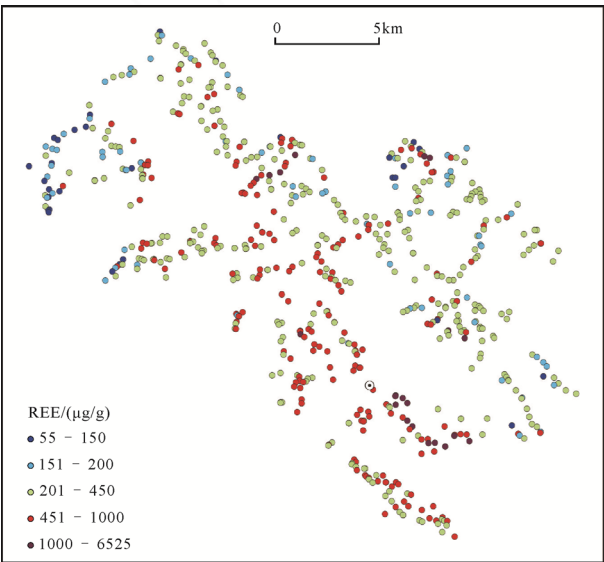
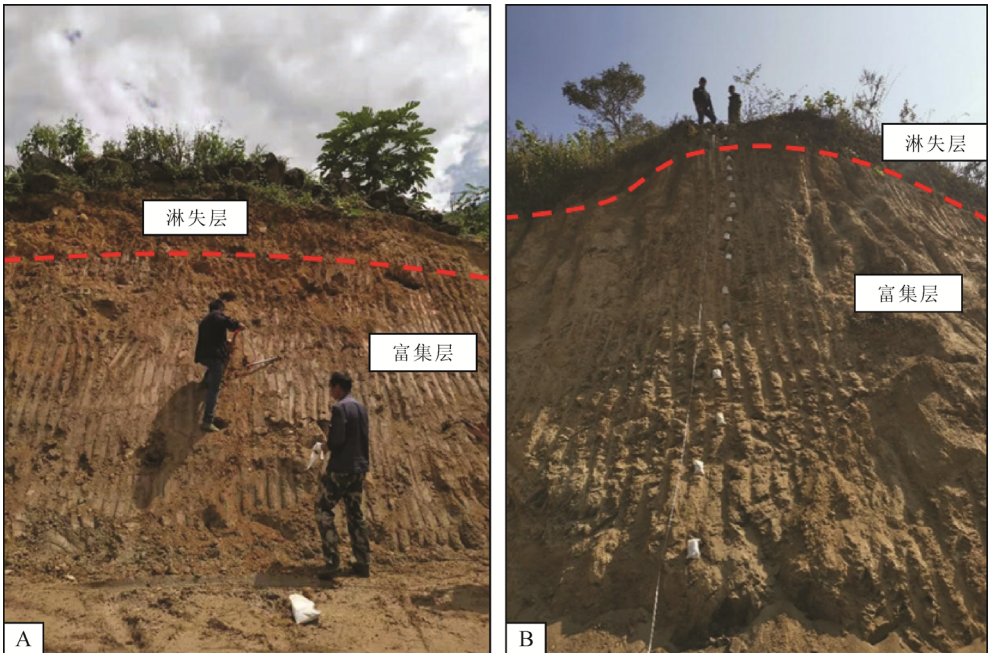


图 4 红河州红河 I 号马锅底异常 1:5 万地球化学测量
Fig. 4 REE geochemical data dot map by 1:50 000 geochemical survey at Maandi, Honghe, Yunnan

化壳剖面进行系统测量。风化壳离子吸附型稀土矿主要分布在全风化层, 部分可向上延续到黏土化层、向下延续到半风化层, 地表腐殖层和部分黏土化层为淋失层, 分别按不同层位连续取样(图 5)。对部分样品, 利用野外快速分析方法初步判别矿化体(图 6), 全部样品送实验室进行稀土全量分析和浸出相分析。共采集风化壳剖面 84 个, 样品 377 件, 其中达到边界品位剖面 70 个(表 2)。

2.2 钻探取样验证

赣南钻是江西地矿局为离子吸附型稀土矿普查勘探发明的专用取样钻(图 7)。利用赣南钻快速查明矿体、深度、产状、规模、矿石质量、品位变化及空间分布特征。赣南钻按照山顶、山腰、山脚的地貌形态布置孔位, 钻探深度揭穿全风化层, 尽量达到矿体底板, 每 1 m 采集 1 件样品。从上往下逐层采集腐殖层、黏土化层、全风化层、半风化层、



A—母岩为钾长变粒岩; B—母岩为二长花岗岩。
A—the parent rock is potassium-elongated granulite; B—the parent rock is monzogranite.

图 5 离子吸附型稀土矿风化壳剖面采样
Fig. 5 Geochemical survey for ion-adsorption REE hosted in regolith profile



图 6 野外驻地快速分析判离子吸附型稀土矿：雪花状沉淀(原照片)

Fig. 6 Snowflake showing ion-adsorbed REE using field chemical analysis



图 7 赣南钻探勘查

Fig. 7 Drilling exploration using Gannanzuan rig

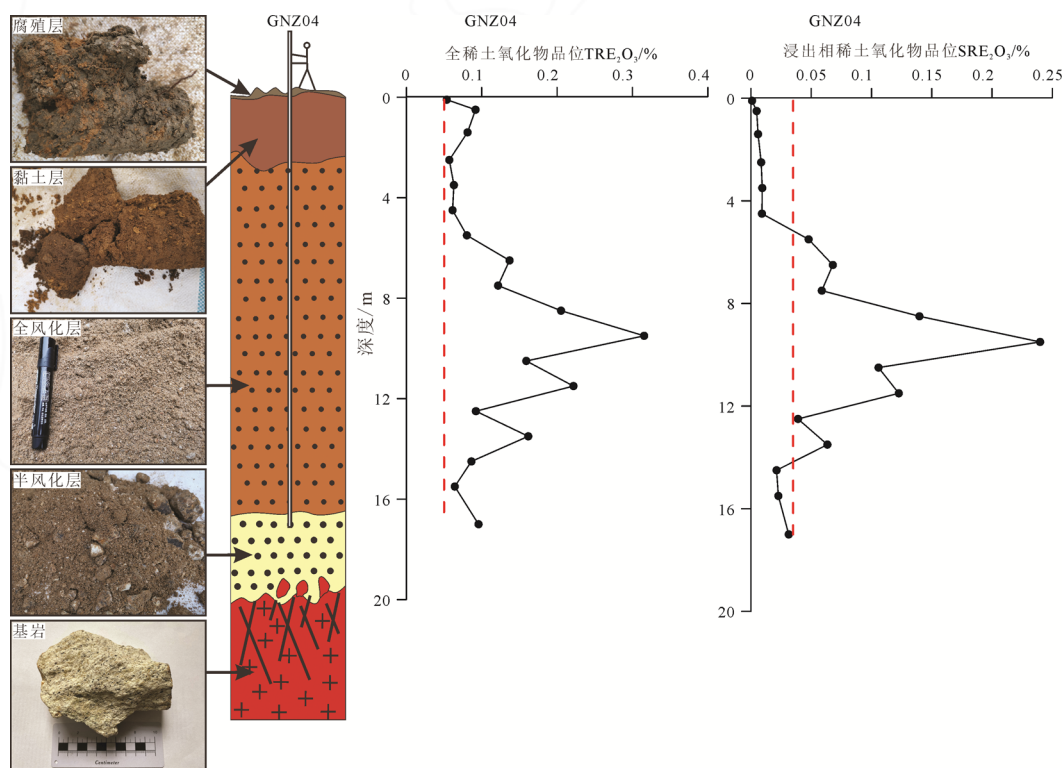


图 8 马鞍底 GNZ04 孔正长花岗岩风化壳剖面稀土总量和浸出离子吸附稀土含量变化(红线为边界品位)

Fig. 8 Regolith with REE contents of total digest (TRE_2O_3) and leaching ion-adsorbed REE (SRE_2O_3) of Maandi Core GNZ04 (red dash line showing cut-off grade)

表 2 赣南钻与自然风化壳测量实物工作量
Table 2 Work quantity of natural and drilling regolith profiles

工作手段	工作区	自然风化壳剖面测量	风化壳剖面平均深度/m	钻探验证孔	达到边界品味样品数
剖面测量实物工作量	红河 I 号	45(40 个剖面达到边界品位)	13.2	24(23 孔达到边界品位)	378 件
	红河 II 号	17(10 个剖面达到边界品位)	13.7	3(全达到边界品位)	31 件
	红河 III 号	22(20 个剖面达到边界品位)	17.0	2(全达到边界品位)	86 件
	总计	84(70 个剖面达到边界品位)	9.6	29 个(28 个孔达到边界品位)	495 件

基岩样品(图 8)。样品混匀后送实验室分析, 样品重量 1 kg。图 8 是马锅底矿体 GNZ4 钻孔岩芯稀土氧化物总量、离子相分布。从含量分布可以看出, 稀土氧化物总量按 0.05%边界品位, 全孔含量均高于矿体边界品位, 但利用浸出离子吸附相 0.035%边界品位, 从 4 m 以下达到边界品位(图 8)。使用赣南钻进行钻探验证孔共 29 个, 其中 28 个孔达到边界品位(表 2)。

3 潜在资源量初步估算

潜在资源量的估算是依据 28 个钻孔和 70 个风化壳剖面揭示达到边界品位的矿体进行估算, 但勘探程度远未达到提交资源量工作程度, 因此本文使用潜在资源量这一表述。

根据稀土矿产地质勘查规范(DZ/T 0204—2002)和风化壳离子吸附型稀土矿产地质勘查规范(DB 36/T 1158—2019), 轻稀土矿稀土氧化物(TRE_2O_3)最低边界品位和工业品位分别为 0.05%和 0.08%, 重稀土矿稀土氧化物(TRE_2O_3)最低边界品位和工业品位分别为 0.03%和 0.06%。

潜在矿石量和资源量的估算:

矿石量=矿体面积×矿体平均厚度×矿石密度

资源量=矿石量×平均品位(%)

离子吸附型稀土矿含矿层位是基岩上方风化壳, 受成矿母岩和地形地貌控制, 因此矿体面积根据边界品位、地形和母岩综合圈定。平均品位和矿体厚度根据自然剖面 and 钻探实际测量结果, 矿区内风化壳稀土总量高于边界品位所有样品的平均值。矿石密度按照 0.5 m×0.5 m×0.5 m 采集矿石样, 称重求得矿石密度为 2.0 t/m³。浸出率是衡量风化壳离子吸附型稀土矿床重要的经济指标。按照国家行业标准“离子型稀土原矿化学分析方法离子相稀土总量的测定(XB/T 619—2015)”分析测定了平均浸出率。综合考虑上述因素, 圈定了潜在马锅底超大型、贾沙大型和大寨中型稀土矿。

马锅底稀土矿位于云南省红河州金平县马锅底乡一勐桥乡一带, 达到品位的自然剖面/赣南钻数量为 62 个, 稀土氧化物总量(TRE_2O_3)平均品位 0.14%。矿床类型以离子吸附型为主, 在局部地区发现砂矿, 砂矿稀土氧化物总量(TRE_2O_3)达 2.6%。圈定的矿体面积为 24.37 km², 估算的潜在矿石量为

4.77 亿吨, 潜在稀土氧化物资源量为 63.6 万吨, 达到超大型规模。马锅底稀土矿主要由印支期正长花岗岩和元古代哀牢山群花岗岩质片麻岩和变粒岩风化形成, 根据自然剖面 and 钻探结果, 结合地形地貌综合圈定矿体 6 处, 分别为 1 号、2 号、3 号、4 号、5 号和 6 号矿体。

马锅底 1 号矿体: 由哀牢山群褐黄色含霓辉石花岗岩质片麻岩、白色钾长变粒岩和灰白色二长变粒岩风化形成。遥感影像图显示, 稀土矿分布在盆山过渡带的平缓丘陵区, 有利于风化壳稀土矿的保存。初步探明矿区出露面积 5.82 km², 矿体厚度 7.2~21 m, 平均厚度 13.12 m, 12 个赣南钻/自然风化剖面达到边界品位。稀土氧化物 TRE_2O_3 含量 0.05%~0.33%, 平均为 0.12%。稀土离子相 SRE_2O_3 含量 0.035%~0.29%, 浸出率平均为 52%。以富集轻稀土镧、铈、镨、钕为主, 富集重稀土元素钇、铽、铈、镱, Y_2O_3 离子相最高达到 367 μg/g, Dy_2O_3 离子相最高达到 91.5 μg/g, Tb_2O_3 离子相最高达到 17.2 μg/g, Gd_2O_3 离子相最高达到 113 μg/g。初步估算稀土氧化物资源量为 19.08 万吨, 达到大型规模(表 3)。

马锅底 2 号矿体: 由哀牢山群白色钾长变粒岩风化形成。遥感影像图显示, 稀土矿体分布在盆山过渡带的平缓丘陵区, 有利于风化壳稀土矿的保存。初步探明矿区出露面积 2.55 km², 矿体厚度 2.5~14 m, 平均厚度 9.38 m, 9 个赣南钻/自然风化剖面达到边界品位。矿体以离子吸附型为主, 在局部地区形成砂矿。离子吸附型稀土矿体稀土氧化物 TRE_2O_3 含量 0.05%~0.38%, 平均为 0.15%。稀土离子相 SR_2O_3 含量 0.035%~0.12%, 浸出率平均为 34%。砂矿矿体稀土氧化物 TR_2O_3 含量最高为 2.6%。以富集轻稀土镧、铈、镨、钕为主, 局部地区富集重稀土钇、铽、铈、镱, Y_2O_3 离子相最高达到 195 μg/g, Dy_2O_3 离子相最高达到 39.4 μg/g, Gd_2O_3 离子相最高达到 44.6 μg/g。初步估算 TRE_2O_3 资源量为 7.08 万吨, 达到中型规模。

马锅底 3 号矿体: 由哀牢山群花岗岩质片麻岩和印支期花岗岩风化形成。遥感影像图显示, 稀土矿体分布在高山斜坡地区, 有利于风化壳稀土矿的保存。初步探明矿区出露面积 1.34 km², 矿体厚度 3.7~10 m, 平均厚度 6.38 m, 6 个赣南钻/自然风化剖面达到边界品位。稀土氧化物 TRE_2O_3 含量

0.05%~0.25%，平均为 0.11%。稀土离子相 SRE_2O_3 含量 0.035%~0.15%，浸出率平均为 41%。以富集轻稀土镧、铈、镨、钕为主，局部地区富集重稀土钆、铽、镱和铕。 Y_2O_3 离子相最高达到 154 $\mu\text{g/g}$ ， Dy_2O_3 离子相最高达到 32.2 $\mu\text{g/g}$ ， Gd_2O_3 离子相最高达到 55.4 $\mu\text{g/g}$ 。初步估算 TRE_2O_3 资源量为 2.09 万吨，达到中型规模。

马鞍底 4 号矿体：由印支期灰色弱碎裂化正长花岗岩风化形成。遥感影像图显示，稀土矿体分布在盆山过渡带的平缓丘陵区，有利于风化壳稀土矿的保存。初步探明矿区出露面积 5.12 km^2 ，矿体厚度 4.4~13 m，平均厚度 9.68 m，9 个赣南钻/自然风化剖面达到边界品位。稀土氧化物 TRE_2O_3 含量 0.05%~0.32%，平均为 0.11%。稀土离子相 SRE_2O_3 含量 0.035%~0.24%，浸出率平均为 53%。以富集轻稀土镧、铈、镨、钕为主，富集重稀土钆、铽、镱、铕和铕。 Y_2O_3 离子相最高达到 78 $\mu\text{g/g}$ ， Dy_2O_3 离子相最高达到 40.1 $\mu\text{g/g}$ ， Gd_2O_3 离子相最高达到 73.8 $\mu\text{g/g}$ 。初步估算 TRE_2O_3 资源量为 10.76 万吨，达到大型规模。

马鞍底 5 号矿体：由哀牢山群灰白色含霓辉石钾长片麻岩和灰色黑云母片岩风化形成。遥感影像图显示，稀土矿体分布在盆山过渡带的平缓丘陵区，有利于风化壳稀土矿的保存。初步探明矿区出露面积 3.64 km^2 ，矿体厚度 3~20 m，平均厚度 10.48 m，14 个赣南钻/自然风化剖面达到边界品位。矿体以离子吸附型为主，在局部地区形成砂矿。离子吸附型稀土矿体稀土氧化物 TRE_2O_3 含量 0.05%~0.82%，平均为 0.21%。稀土离子相 SRE_2O_3 含量

0.035%~0.27%，浸出率平均为 41%。砂矿矿体稀土氧化物 TR_2O_3 含量最高为 1.7%。以富集轻稀土镧、铈、镨、钕为主，局部地区富集重稀土钆、铽、镱、铕和铕。初步估算 TRE_2O_3 资源量为 16.02 万吨，达到大型规模。

马鞍底 6 号矿体：由哀牢山群灰白色含霓辉石花岗质片麻岩和印支期花岗岩风化形成。遥感影像图显示，稀土矿分布在盆山过渡带的平缓丘陵区，有利于风化壳稀土矿的保存。初步探明矿区出露面积 5.89 km^2 ，矿体厚度 3~8 m，平均厚度 6.25 m，12 个赣南钻/自然风化剖面达到边界品位。稀土氧化物 TRE_2O_3 含量 0.05%~0.37%，平均为 0.12%。稀土离子相 SRE_2O_3 含量 0.035%~0.22%，浸出率平均为 45%。富集轻稀土和重稀土，以镧、铈、钕、钐、铽、铕为主。 Y_2O_3 离子相最高达到 420 $\mu\text{g/g}$ ， Dy_2O_3 离子相最高达到 90.8 $\mu\text{g/g}$ ， Gd_2O_3 离子相最高达到 118 $\mu\text{g/g}$ 。初步估算 TRE_2O_3 资源量为 16.02 万吨，达到大型规模。

4 意义与结论

4.1 意义

科学意义：这是我国首次在滇南红河州的最南端中越边境地区发现潜在超大型离子吸附型矿床集中区，该矿床的特点是位于高海拔地区，且同时富集轻、重稀土和分散元素，对于重新认识中国及邻区稀土矿的分布规律和形成机理具有重要的科学意义，丰富了稀土找矿模式。

我国已发现的富含重稀土离子吸附型稀土矿均位于低海拔、气候炎热、潮湿，有利于岩石强化

表 3 根据钻孔和风化壳剖面潜在资源量估算表
Table 3 Estimated reserves of undiscovered deposits

矿床名称	矿体编号	达到品位的 风化壳 剖面数	矿体面积 / km^2	矿体平均 厚度 /m	矿石量 /万 t	平均品位 ($\text{TR}_2\text{O}_3/\%$)	平均浸出 率/%	稀土氧化 物资源量/t	轻稀土氧化 物资源量/t	重稀土氧化 物资源量/t	潜在矿 床规模
马鞍底 稀土矿	1 号矿体	12	5.82	13.12	16 216	0.12%	52%	190 810	161 338	29 472	潜在 超大型
	2 号矿体	9	2.55	9.38	4 786	0.15%	34%	70 795	62 501	8 294	
	3 号矿体	6	1.34	6.83	1 836	0.11%	41%	20 905	17 638	3 267	
	4 号矿体	9	5.12	9.68	9 918	0.11%	53%	107 601	83 585	24 017	
	5 号矿体	14	3.64	10.48	7 634	0.21%	41%	160 194	148 486	11 708	
	6 号矿体	12	5.89	6.25	7 358	0.12%	45%	85 885	67 788	18 097	
马鞍底 稀土矿床		62	24.36	9.29	47 748	0.14%	44%	636 190	541 336	94 855	
大寨 稀土矿	大寨	7	1.84	7.48	2 753	0.15%	40%	41 165	36 716	4 449	潜在 中型
贾沙 稀土矿	贾沙	22	25.51	8.65	44 131	0.07%	39%	327 212	289 421	37 791	潜在 大型
总计		91			94 630			1 004 567	867 472	137 095	

注：引自《稀土矿产地质勘查规范(DZ/T 0204—2002)》离子吸附型稀土矿边界品位：轻稀土矿边界品位(稀土氧化物)：0.05%~0.1%，工业品位：0.08%~0.15%；重稀土矿边界品位(稀土氧化物)：0.03%~0.05%，工业品位：0.06%~0.1%；大型稀土矿资源量：大于 10 万吨，中型 1~10 万吨，小型 < 1 万吨。

学风化的华南花岗岩风化壳地区。尽管近些年在云南滇西高海拔地区的腾冲—龙川相继发现了多个离子吸附型稀土矿(李建忠等, 2017; 毛景文等, 2019; 李余华等, 2019; 陆蕾等, 2020; 明添学等, 2021), 但都以轻稀土矿为主。本次在滇南高海拔地区发现富含重稀土离子吸附型稀土矿, 尚属首次。高海拔区同时富含轻、重稀土和稀有分散元素离子吸附型稀土矿是如何形成的, 与气候、降雨量、生物作用和地形地貌的关系, 每个稀土元素的品位等都有待于进一步研究。

研究区位于特提斯构造域、扬子克拉通西缘与华南造山带交汇处, 是印度与欧亚大陆碰撞事件的重要响应带。该矿带在攀西裂谷中形成与喜马拉雅期碳酸岩-碱性杂岩体有关的稀土矿(侯增谦等, 2008), 如世界第三大的牦牛坪稀土矿。近年在这一成矿带的南段建水发现与碱性杂岩体风化有关的大型普雄离子吸附型铈稀土矿床(李余华等, 2019)。本次发现的矿床成矿母岩不仅有印支期和燕山期花岗岩, 还有元古界花岗岩质片麻岩和变粒岩。尽管与变质岩作为成矿母岩的离子吸附型稀土矿已有报道(毛景文等, 2019), 但该区的成矿地质背景和成矿母岩有待进一步研究。

根据目前自然剖面和钻探测量初步发现稀土矿体在风化层中的分布有 3 种模式: (I)中间高两头低, 即稀土元素在中部全风化层富集, 在上部腐殖层和黏土层、下部接近基岩的半风化层含量低; (II)表层低深层高, 即稀土含量在风化层中从地表到深部逐渐增高; (III)表层高深层低, 即稀土元素在风化剖面中的含量从地表到接近基岩降低。三种分布模式与地形地貌、地表剥蚀程度、降雨量、生物作用、成矿母岩等的控制因素有待进一步研究。

技术意义: 联合攻关解决了离子吸附型稀土矿由于表生淋滤作用和粗颗粒水系沉积物难以发现异常的难题, 实现了高海拔山区离子吸附型稀土矿地球化学勘查理论和方法技术创新, 填补了高海拔山区离子吸附型稀土矿勘查技术空白。发展了多尺度地球化学勘查技术和异常查证技术, 初步形成从区域战略选区到矿区普查和异常查证的地球化学勘查技术系列。

我国 20 世纪 70 年代末期开始的基于水系沉积物测量的“区域化探全国扫面计划”对金矿和有色金属矿发挥了重要作用(Wang et al., 2016)。但由于当时实验室能力限制, 分析的 39 个元素仅包含镧和钇两个稀土元素(谢学锦, 1978), 再加上对稀土的存在形式和异常形成机理缺少研究, 当时设计的水系沉积物采样方法, 无法提供有价值的稀土异常信息。此次专门对稀土矿地球化学勘查理论技术研究,

根据稀土元素易于风化形成离子被细粒级黏土矿物吸附的特点, 发展了从极低密度的全国地球化学基准河漫滩采样方法、1:25 万和 1:5 万细粒级水系沉积物采样方法、自然风化壳剖面采样和浅钻采样异常查证方法、实验室稀土元素的高精度分析技术, 形成了稀土矿地球化学勘查完整技术系列。

离子吸附型稀土矿由于在地表被淋滤贫化和难以肉眼判别矿化现象, 因此传统的地表土壤测量方法和异常查证方法难以奏效。利用自然切割风化壳剖面 and 快速简易的手动浅钻联合取样方法, 用于异常查证, 可以快速发现稀土富集层位。

实验室使用四酸溶样和 ICP-MS 分析技术, 实现对全部 16 个稀土元素的高精度分析, 分析检出限可以达到 $0.1 \mu\text{g/g}$ 。同时利用野外现场分析技术针可以初步快速判别离子吸附型稀土矿, 利用实验室浸出相分析技术可以精确判断浸出率。

经济意义: 通过 84 个风化壳剖面 and 29 个钻孔测量, 有 70 个剖面 and 28 个钻孔达到边界品位, 初步圈定马鞍底潜在超大型、大寨和贾沙潜在大中型富含重稀土的离子吸附型稀土矿。本文使用富含重稀土离子吸附型稀土矿(HREE-enriched ion-adsorption deposit)表述, 而不使用重稀土离子吸附型稀土矿(HREE ion-adsorption deposit)这一概念, 因为目前对重稀土矿的定义还没有统一认识, 每个单个稀土元素品位和资源量有待于进一步勘查。初步估算稀土潜在矿石量 9.46 亿吨, 稀土氧化物潜在资源约 100 万吨。这是我国首次在滇南地区发现超大型离子吸附型稀土矿。该离子吸附型稀土矿同时富集轻稀土(镧、铈、镨、钕)和重稀土(钐、铽、镱、铕)和稀土元素(铈、钐、镨、钕、钆、铽、镱、铕), 矿体厚度大, 可以通过复垦开采, 具有重大经济价值, 特别是镨、钕、钐、铽、镱是现代高科技和电动汽车的重要原材料, 对高科技和国防安全快速增长的需求以及“碳达峰”和“碳中和”节能材料的需求, 具有重要的战略意义。

4.2 结论

这是我国首次利用从极低密度、低密度直到高密度地球化学填图技术, 获得高质量“化学地球”数据, 在滇南发现超大型离子吸附型稀土矿床集中区, 具有重大经济价值和战略意义。初步形成了稀土矿多尺度地球化学调查技术系列, 填补了离子吸附型稀土矿地球化学勘查技术空白。这一发现对于认识高海拔区富含重稀土的离子吸附型稀土矿成因及中缅老越比邻区稀土矿的分布规律具有重要科学意义, 为“一带一路”沿线国家稀土矿勘查提供了全新的视野。这一发现只对滇南富集区的 3 个异常

进行了 1:5 万和钴探验证工作, 还需开展下一步的普查和详查勘探工作, 系统查明矿体深度和品位。

致谢: 该项成果是在中国地质调查局地质调查项目“化学地球基准与调查评价”(编号: DD20190451)、国家重点研发项目“穿透性地球化学勘查技术”(编号: 2016YFC0600600)和原国土资源部行业专项项目“全国地球化学基准与调查评价”(编号: Sino-probe-04)等支持下, 历经 10 余年的科研与调查紧密结合的成果, 得到了自然资源部、科技部、中国地质调查局的大力支持。先后有 30 余人参加了野外采样、实验室分析测试和薄片鉴定工作。感谢中国地质科学院矿产资源研究所王登红研究员等对这一工作提出的宝贵意见。在此一并向给予项目支持的单位和个人表示衷心感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20190451), National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600600), and SinoProbe (No. Sinoprobe-04).

参考文献:

- 陈毓川, 王登红, 徐志刚. 2015. 中国重要矿产和区域成矿规律[M]. 北京: 地质出版社: 344-368.
- 池汝安, 刘雪梅. 2019. 风化壳淋积型稀土矿开发的现状及展望[J]. 中国稀土学报, 37(2): 129-140.
- 董树文, 李廷栋. 2009. SinoProbe—中国深部探测实验[J]. 地质学报, 83(7): 895-909.
- 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.
- 李童斐, 夏庆霖, 汪新庆, 刘岳, 常力恒, 冷帅. 2018. 中国稀土矿资源成矿地质特征与资源潜力分析[J]. 地学前缘, 25(3): 95-106.
- 李余华, 张子军, 龙庆兵, 刘凤祥, 李明晓, 王敏, 周家喜. 2019. 云南建水普雄钨稀土矿床微量和稀土元素地球化学特征[J]. 矿物学报, 39(4): 474-483.
- 陆蕾, 王登红, 王成辉, 赵芝, 冯文杰, 徐晓春, 陈晨, 钟海仁. 2020. 云南离子吸附型稀土矿成矿规律[J]. 地质学报, 94(1): 179-191.
- 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.
- 明添学, 唐忠, 包从法, 李蓉, 詹冬琴, 杨清标, 郝学峰, 余海军. 2021. 云南省稀土矿分布特征、研究进展与展望[J]. 中国稀土学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2365.TG.20210820.1413.022.html>.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 赵汀, 李建康, 代晶晶, 刘新星, 何哈哈. 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. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 93(6): 1189-1209.
- 王学求, 谢学锦, 张本仁, 侯青叶. 2011. 地壳全元素探测技术与实验示范[J]. 地球学报, 32(S1): 65-83.
- 王学求, 周建, 迟清华, 王玮, 张必敏, 聂兰仕, 刘东盛, 徐善法, 吴慧, 高燕芳. 2020. 中国稀土元素地球化学背景与远景区优选[J]. 地球学报, 41(6): 747-758.
- 王学求, 周建, 徐善法, 迟清华, 聂兰仕, 张必敏, 姚文生, 王玮, 刘汉粮, 刘东盛, 韩志轩, 柳青青. 2016. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征[J]. 中国地质, 43(5): 1469-1480.
- 王学求. 2012. 全球地球化学基准: 了解过去, 预测未来[J]. 地学前缘, 19(3): 7-18.
- 谢学锦. 1978. 区域化探全国扫面规划[J]. 物化探研究报导, 3: 28-36.
- 袁忠信, 白鸽. 2001. 中国内生稀有稀土矿床的时空分布[J]. 矿床地质, (04): 347-354.
- 袁忠信, 李建康, 王登红, 郑国栋, 姜德波, 陈郑辉, 赵芝, 于扬. 2012. 中国稀土矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社: 1-116.
- 张勤, 白金峰, 王烨. 2012. 地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统[J]. 地学前缘, 19(3): 33-42.
- 周美夫, 李欣禧, 王振朝, 李晓春, 刘嘉成. 2020. 风化壳型稀土和钽矿床成矿过程的研究进展和展望[J]. 科学通报, 65(33): 3809-3824.

References:

- CHAU N D, JADWIGA P, ADAM P, VAN HAO D, PHON L K, PAWEŁ J. 2017. General characteristics of rare earth and radioactive elements in Dong Pao deposit, Lai Chau, Vietnam[J]. Vietnam Journal of Earth Sciences, 39(1): 14-26.
- CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, XU Zhi-gang. 2015. Important mineral resources and regional metallogenic regularity in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 344-368(in Chinese).
- CHI Ru-an, LIU Xue-mei. 2019. Prospect and development of weathered crust elution-deposited rare earth ore[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 37(2): 129-140(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong. 2009. SinoProbe: the Exploration of the Deep Interior Beneath the Chinese Continent[J]. Acta Geologica Sinica, 83(7): 895-909(in Chinese with English abstract).
- European Commission. 2014. Report on critical raw materials for the EU: Report of the Ad hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials[R]. Brussels: European Commission: 41.
- HOU Zeng-qian, TIAN Shi-hong, XIE Yu-ling, YUAN Zhong-xin, YANG Zhu-sen, YIN Shu-ping, FEI Hong-cai, ZOU Tian-ren, LI Xiao-yu, YANG Zhi-ming. 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 Chi-

- nese with English abstract).
- LI Tong-fei, XIA Qing-lin, WANG Xin-qing, LIU Yue, CHANG Li-heng, LENG Shuai. 2018. Metallogenic geological characteristics and mineral resource potential of rare earth element resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 95-106(in Chinese with English abstract).
- LI Yu-hua, ZHANG Zi-jun, LONG Qing-bing, LIU Feng-xiang, LI Ming-xiao, WANG Min, ZHOU Jia-xi. 2019. Trace elements and REE geochemical characteristics of the Puxiong Nb-REE deposit in Jianshui City, Yunnan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 39(4): 474-483(in Chinese with English abstract).
- LU Lei, WANG Deng-hong, WANG Cheng-hui, ZHAO Zhi, FENG Wen-jie, XU Xiao-chun, CHEN Chen, ZHONG Hai-ren. 2020. The metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(1): 179-191(in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen, YUAN Shun-da, XIE Gui-qing, SONG Shi-wei, ZHOU Qi, GAO Yong-bao, LIU Xiang, FU Xiao-fang, CAO Jing, ZENG Zai-lin, LI Tong-guo, FAN Xi-yin. 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).
- MING Tian-xue, TANG Zhong, BAO Cong-fa, LI Rong, ZHAN Dong-qin, YANG Qing-biao, HAO Xue-feng, YU Hai-jun. 2021. Prospect, research progress and distribution characteristics of rare earth minerals in Yunnan Province[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2365.TG.20210820.1413.022.html>(in Chinese with English abstract).
- SCHULZ K J, DEYOUNG J H, SEAL R R, BRADLEY D C. 2017. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. Reston: U.S. Geological Survey.
- WANG Deng-hong, ZHAO Zhi, YU Yang, ZHAO Ting, LI Jian-kang, DAI Jing-jing, LIU Xin-xing, HE Han-han. 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. 2019. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1189-1209(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, XIE Xue-jin, ZHANG Ben-ren, HOU Qing-ye. 2011. Geochemical probe into China's continental crust[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(S1): 65-83(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, ZHANG Bi-min, LIN Xin, XU Shan-fa, YAO Wen-sheng, YE Rong. 2016. Geochemical challenges of diverse regolith-covered terrains for mineral exploration in China[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 417-431.
- WANG Xue-qiu, ZHANG Bi-min, NIE Lan-shi, WANG Wei, ZHOU Jian, XU Shan-fa, CHI Qin-hua, LIU Dong-sheng, LIU Han-liang, HAN Zhi-xuan, LIU Qing-qing, MI Tian, ZHANG Bao-yun, WU Hui, LI Rui-hong, HU Qing-hai, YAN Tao-tao, GAO Yan-fang. 2020. Mapping Chemical Earth Program: Progress and challenge[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 217: 106578.
- WANG Xue-qiu, ZHOU Jian, CHI Qing-hua, WANG Wei, ZHANG Bi-min, NIE Lan-shi, LIU Dong-sheng, XU Shan-fa, WU Hui, GAO Yan-fang. 2020. Geochemical background and distribution of rare earth elements in China: Implications for potential prospects[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 747-758(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu, ZHOU Jian, XU Shan-fa, CHI Qing-hua, NIE Lan-shi, ZHANG Bi-min, YAO Wen-sheng, WANG Wei, LIU Han-liang, LIU Dong-sheng, HAN Zhi-xuan, LIU Qing-qing. 2016. China soil geochemical baselines networks: Data characteristics[J]. *Geology in China*, 43(5): 1469-1480(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu. 2012. Global geochemical baselines: Understanding the past and predicting the future[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 7-18(in Chinese with English abstract).
- WANG Xue-qiu. 2015. China geochemical baselines: Sampling methodology[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 148: 25-39.
- XIE Xue-jin. 1978. Regional Geochemistry-National Reconnaissance Project[J]. *Bulletin of Geophysical and Geochemical Exploration*, 3: 28-36(in Chinese).
- XIE Yu-ling, HOU Zeng-qian, GOLDFARB R J, GUO Xiang, WANG Lei. 2016. Rare earth element deposits in China[J]. *Reviews in Economic Geology*, 18: 115-136.
- YUAN Zhong-xin, BAI Ge. 2001. Temporal and spatial distribution of endogenic rare and rare earth mineral deposits of China[J]. *Mineral deposits*, (04): 347-354(in Chinese with English abstract).
- YUAN Zhong-xin, LI Jian-kang, WANG Deng-hong, ZHENG Guo-dong, LOU De-bo, CHEN Zheng-hui, ZHAO Zhi, YU Yang. 2012. Metallogenic regularity of rare earth deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-116(in Chinese).
- ZHANG Qin, BAI Jin-feng, WANG Ye. 2012. Analytical scheme and quality monitoring system for China geochemical baselines[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 33-42(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Mei-Fu, LI M Y H, WANG Zhen-chao, LI Xiao-Chun, LIU Jia-cheng. 2020. The genesis of regolith-hosted rare earth element and scandium deposits: Current understanding and outlook to future prospecting[J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3809-3824(in Chinese with English abstract).