

滇黔相邻区二叠系宣威组富稀土黏土岩综合研究进展

蒋晓丽¹, 龚大兴¹, 周家云¹, 田恩源¹, 晁文文²

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 四川 成都 610041; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610041)

摘要:在滇黔相邻区峨眉山玄武岩之上, 二叠系宣威组下部广泛分布一套富稀土黏土岩。作为一种新类型的潜在稀土资源, 诸多学者对其进行了研究, 包括成矿条件、赋存状态、富集规律、综合利用方式等多个方面都有了较大的进展。该类型稀土具有非常大的资源潜力, 区域连续性好、集中程度高, 富含高价值的稀土元素镨、钕、铽、镱, 经济价值和开发利用潜力巨大。本文全面总结了宣威组稀土目前的研究进展和存在的关键问题, 提出了下一步研究方向。当前对于宣威组富稀土黏土岩中稀土元素的富集机理尚未明确, 进一步开展成矿理论研究是找矿突破的关键; 赋存状态的研究亟待突破, 对该新类型稀土的综合利用技术突破, 后期绿色勘查开发具有重要的意义; 综合利用方面, 经济可行的绿色选冶技术、伴生的铝、铈、镓、铟、钛等有价值元素的综合回收、尾矿的资源化消纳等方面是下一步的主攻方向。

关键词:新类型稀土; 滇黔相邻区; 宣威组; 富集机理; 综合利用潜力

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.000000

中图分类号: TD981 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 01-0038-10

具有“工业维生素”之称的稀土元素, 被广泛应用于农业、工业、军事等行业, 是新材料制造的重要依托和关系尖端国防技术开发的关键性资源^[1]。目前全球稀土消费中, 稀土永磁、催化剂、抛光材料和冶金等运用最广, 这几种新兴产业都是全球的朝阳产业, 它们的快速发展将拉动稀土需要增长, 稀土需求越来越大。一家研究咨询公司表示, 如果市场继续正常运转, 就会出现供应短缺的问题。因此, 加强对中重稀土资源的勘察以及开发利用是首要目标。滇黔相邻区宣威组底部具有一组富稀土黏土岩, 富含高价值的中重稀土元素镨、钕、铽、镱, 经济价值和开发利用潜力巨大。

有关川滇黔相邻区宣威组下部稀土富集最早报道出现在《贵州 1:20 万威宁幅区域地质调查

报告》(贵州省地质矿产局, 1972)中, 提到威宁鹿房地区宣威组底部见稀土矿化层, 且伴生有 Ga、U、Th、Nb, 认为该富稀土层为玄武岩风化而成的红土风化壳离子吸附型稀土矿^[2]。自此诸多学者对富稀土层展开了研究。翟明国等^[1]认为其为玄武岩风化壳型 Nb-Ga-REE 矿床, 并将其列为新类型关键金属矿床之一; 代世峰等^[3]认为稀土富集层是碱性火山灰蚀变为黏土岩形成的具有高经济价值的煤系 Nb-Zr-REE-Ga 矿床; 杨瑞东^[4]等认为其属于峨眉山玄武岩风化壳型富稀土资源; 田恩源等^[5]认为富稀土层是以玄武岩、凝灰岩和火山碎屑岩为风化母岩的沉积型稀土矿床; 袁民汕等^[6]认为该层为古风化壳型铈-铈-稀土矿化富集层。从成因类型的巨大争议来看, 宣威组下部稀土有别于传统的碳酸岩型稀土矿, 碱性岩型稀土

收稿日期: 2021-12-01

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“滇黔相邻区稀土资源基地综合地质调查”(DD20211236); “格陵兰岛西南部稀土-铀矿产资源潜力评价”(DD20190446)

作者简介: 蒋晓丽 (1997-), 女, 硕士, 研究方向为矿床地球化学。

通信作者: 周家云 (1974-), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为矿床地球化学。

矿以及离子吸附型稀土矿，属于一种新类型的稀土资源。最新的调查结果显示，整个滇黔相邻区宣威组稀土的远景资源量十分可观，区域连续性好、集中程度高，富含高价值的稀土元素镨、钕、铽、镝，经济价值和开发利用潜力巨大^[7]。但目前，该稀土的成矿条件、富集机理、赋存状态、综合利用方式等方面都存在较多的争议。本文全面总结了宣威组稀土已有的研究进展，讨论了关键科学问题，对产学研结合，深入开展该类型稀土的勘查开发工作指明了方向。

1 地质特征

1.1 分布范围

滇黔相邻区二叠系宣威组富稀土黏土岩广泛分布在云南省东北部昭通、曲靖，贵州省西北部毕节、六盘水地区（图 1）。大地构造位置属于特提斯-喜马拉雅与滨太平洋两大全球巨型构造域结合部位，扬子准地台西南缘段，黔北台隆遵义断拱贵阳复杂构造变形区的西段，南邻右江造山带^[8]。位于全国 26 个重要成矿区带之一的上扬子西缘成矿带，滇东-川南-黔西 Pb-Zn-Fe-REE-磷-硫铁矿-钙芒硝-煤和煤层气成矿带，区内能源（煤、煤层气、页岩气）、三稀（稀土、铌、锂、镉、铈、镓等）矿产资源十分丰富^[9]。

1.2 地层及岩石特征

区内主要出露的地层为石炭系与二叠系的地层为主，本文主要介绍富稀土层密切相关的地层，即下伏的晚二叠系峨眉山玄武岩组、陆相沉积的宣威组以及同时异相的海相沉积的龙潭组，研究区内宣威组与龙潭组的相变界限大致位于盐源-镇雄-赫章-六盘水一线（图 1）。稀土异常富集仅出现在陆相沉积的宣威组地层中，海陆过渡相沉积的龙潭组未见稀土富集^[10]。

（1）二叠系峨眉山玄武岩组（ $P_{2-3}em$ ）

峨眉山大火成岩省形成于晚二叠世，广泛分布在扬子板块西缘，主要由玄武岩和基性-超基性

侵入岩组成^[10]。贵州西部峨眉山玄武岩的元素地球化学特征为富集不相容微量元素、稀土元素、Ti、F、Rb、Sr、K、U、Th 含量高，贫 Mg、Ca、Cr 和 Ni，整体偏碱性^[11]。峨眉山大火成岩省的玄武岩因厚度、成分和岩性变化以及侵入岩的岩性组合和规模规律性变化，将其划分为内、中、外三个带^[12]。西部的熔岩类型包括苦橄岩、玄武岩、玄武质安山岩以及玄武质火山碎屑岩；东部为碱性玄武岩。低钛玄武岩分布在上部，主要为扬子克拉通西部边缘分布，而高钛玄武岩在底部分布，覆盖大火成岩省的整个区域^[13]。徐义刚等将 $TiO_2 > 2.8\%$ 的样品定义为高钛玄武岩， $TiO_2 < 2.8\%$ 的样品为低钛玄武岩^[14]；高钛玄武岩具有 $Ti/Y > 500$ 的特征，孙平原等通过对乌蒙山玄武岩进行分析测试研究，贵州乌蒙山二叠系玄武岩中 Ti/Y 比值介于 645~1560，平均值为 $911 > 500$ （高钛玄武岩 $Ti/Y > 500$ ），进一步证明研究区以高钛玄武岩为主^[15]。

（2）二叠系上统宣威组（ P_3x ）

宣威组地层平行不整合与峨眉山玄武岩组之上，整合于三叠系飞仙关组之下的一套陆相含煤碎屑岩，分布于威宁-盘县分区内，即大致在赫章六曲至盘县夹马石一线以西地区。宣威组底层岩性特征及含矿性可分为两段：下段主要由高岭石为主要成分的硬质黏土岩组成，夹厚度不等的煤质页岩与煤线，底部出现分布不均匀的紫红色凝灰岩、凝灰质黏土岩，此段为稀土的主要含矿层；上段主要为灰黄色泥质粉砂岩，夹厚度不等的煤层（1~2 m）。

（3）二叠系上统龙潭组（ P_3l ）

龙潭组平行不整合于二叠系玄武岩组之上，为区内主要煤系地层，沉积相为一套潮坪-三角洲相沉积，主要岩性为灰、深灰色中厚层黏土岩、粉砂质钙质黏土岩，夹绿灰色中厚层玄武岩屑砂岩、粉砂岩、深灰色灰岩、硅质岩及数十层煤（线）泥岩。含菊石、腕足类、蜓类、珊瑚及植

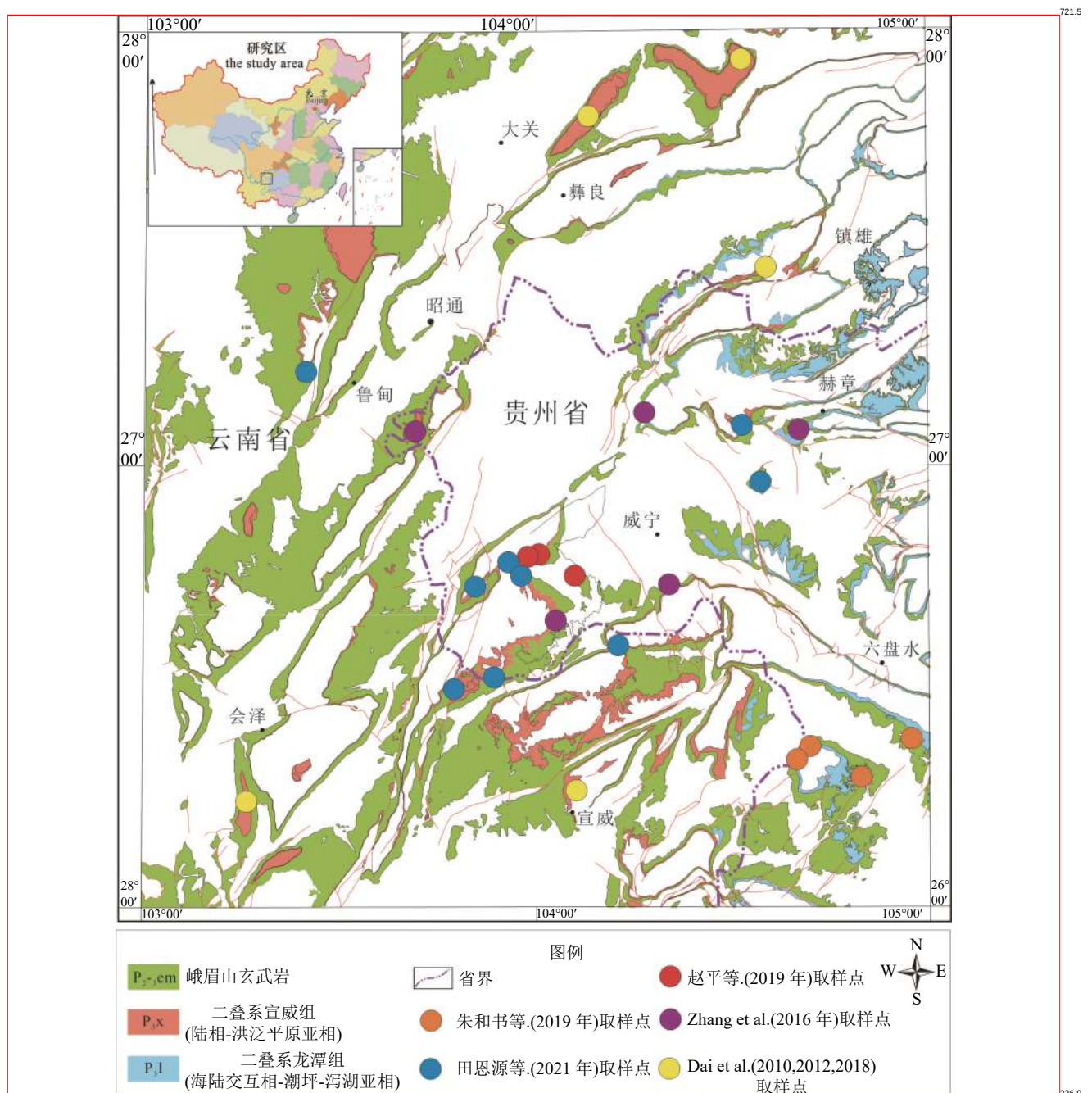


图 1 滇黔相邻区宣威组稀土异常分布规律及区域地质简图

Fig.1 Rare earth anomaly distribution law and regional geological map of Xuanwei Formation in adjacent areas of Yunnan and Guizhou

物化石。

(4) 其他岩性

区域地层发育较为齐全，从震旦系灯影组到第四系均有出露。区内沉积建造多样，震旦纪至二叠纪晚期以海相碳酸盐岩建造为主，早三叠世以后则为陆相碎屑岩建造，晚二叠世时期广泛分

布大陆流溢拉斑玄武岩。二叠系地层还包括位于峨眉山玄武岩组下伏与其呈假整合接触的茅口组灰岩 (P_{2m}) [16]。研究区除二叠系地层外，石炭系地层分布最广。

1.3 富稀土黏土岩的特征

稀土异常富集出现在二叠系宣威组底部，厚

2~20 m, 空间展布较稳定, 岩性为高岭石软质黏土岩和硬质黏土岩, 夹厚度不等的碳质页岩或煤层, 具有凝灰结构、火山角砾以及赤铁矿化^[17]。上覆为黄褐色薄层粉砂质黏土岩与中厚层泥质粉砂岩构成的不等厚韵律层, 下伏为峨眉山玄武岩。样品通过 XRD 结果表明矿物组成为黏土矿物、石英、锐钛矿、方解石、菱铁矿、赤铁矿、钠长石和萤石^[17], 其中黏土矿物为伊利石和蒙脱石的互层、高岭石和绿泥石, 稀土含量与高岭石的含量呈正相关关系^[17]。样品中的高岭石具有两类, 一类符合沉积形成的典型特征, 在电镜下呈自形方板状、半自形和它形, 集合体呈片状、鳞片状、放射状等^[5], 另一类在后期热液溶蚀孔洞中发现以胶结物形式充填的隐晶质集合体, 这类高岭石富集 La, Ce, Er 等稀土元素; 使用 X 射线粉末衍射发现还有粒径较大, 具有长石假象的层状高岭石^[17]。

Dai 等因测井曲线上的高度自然伽马正异常受到启发, 通过对滇东 300 多个钻孔的物探测井曲线结合对岩心样品进行矿物学、岩石学和地球化学的分析结果, 认为富稀土层属于煤型 Nb-Zr-REE-Ga 矿床, 并根据矿石结构将多金属富集层分为碱性火山灰蚀变黏土岩、碱性凝灰质黏土岩、碱性火山凝灰岩和碱性火山角砾岩^[18]; 田恩源等认为稀土富集层为斑团状含粉砂泥质结构、凝灰结构和沉积层状构造的沉积型稀土矿石, 并对稀土富集程度、岩相分布以及岩石组合特征的关系进行了划分^[5]; 张海等认为该层为风化淋积形成的风化壳型稀土矿, 通过对风化壳进行纵向采样, 绘制风化壳稀土含量纵向变化图, 结果表明在稀土元素风化壳中部-全风化-半风化层明显富集, 具备典型风化淋积型稀土矿床稀土元素垂向变化特征^[19]。

综上所述, 对于富稀土黏土岩的认识有以下几种观点: 1) 以蚀变火山灰黏土岩组成的煤型 Nb-Zr-REE-Ga 矿石; 2) 以风化搬运沉积作用为主形

成的沉积型稀土矿石; 3) 以风化淋积作用所形成的风化壳型稀土矿石。

2 异常富集成矿模式研究进展

2.1 稀土元素配分特征

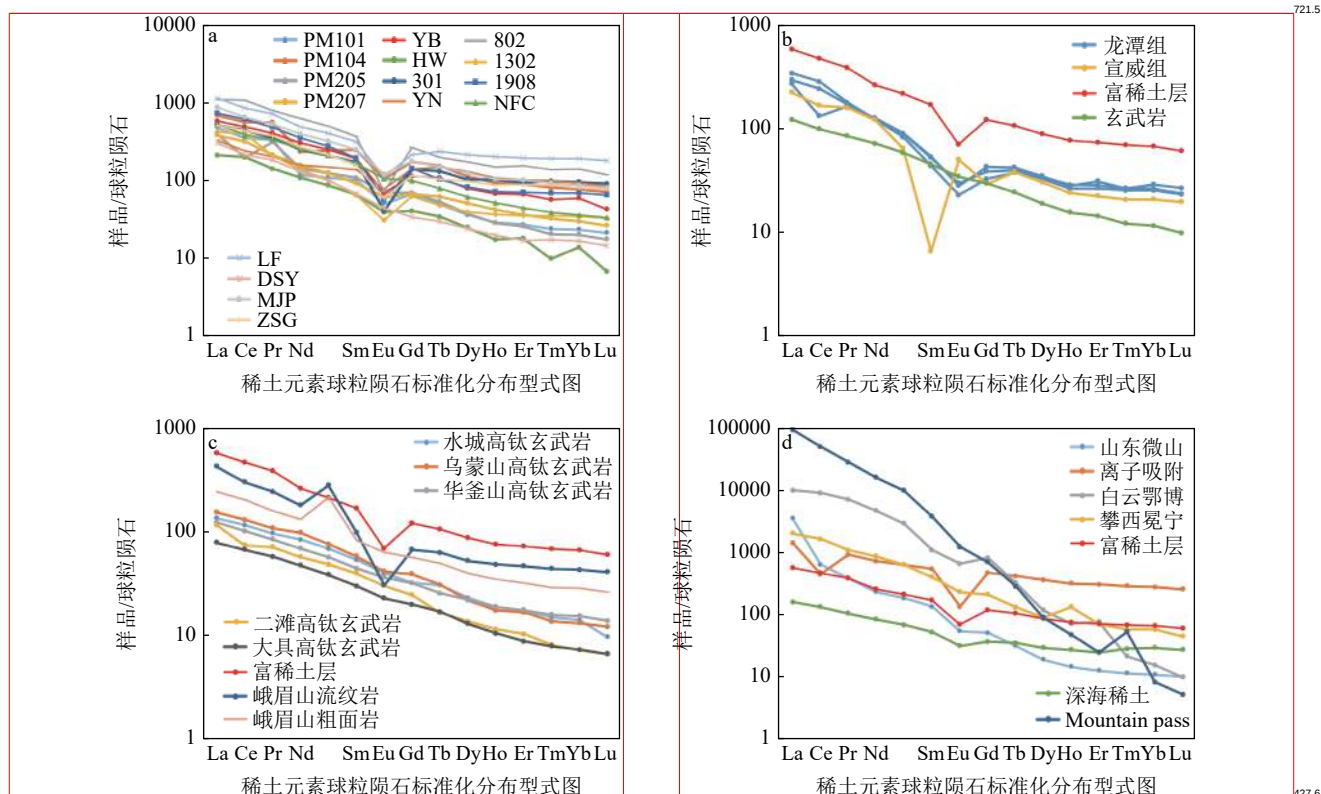
地壳的稀土元素丰度为 $\Sigma\text{REE}: 112 \times 10^{-6}$; 峨眉山高钛玄武岩中稀土元素总量为 $\Sigma\text{REE}: 238 \times 10^{-6}$; 二叠系宣威组地层中稀土元素总量为 $\Sigma\text{REE}: 599 \times 10^{-6}$ ^[20]; 同时异相的龙潭组地层稀土元素总量为 $\Sigma\text{REE}: 454 \times 10^{-6}$ ^[21]; 研究区富稀土层的稀土元素平均总量为 $\Sigma\text{REE}: 901 \times 10^{-6}$, 最高可达 1986.36×10^{-6} 。通过对比, 高钛玄武岩的 ΣREE 高出稀土元素的克拉克值一倍以上; 相较于峨眉山高钛玄武岩的稀土含量, 宣威组与龙潭组均高于玄武岩两倍以上。富稀土层的稀土含量对比于高钛玄武岩的稀土含量高达三倍以上, 可见富稀土层发生了明显的富集作用。从稀土配分来看, 在沉积岩中, 稀土富集层相对于与其形成年代相近的龙潭组以及宣威组沉积岩, 稀土配分模式明显不同(图 2b), 宣威组可见明显的 Ce 与 Sm 的负异常、Eu 正异常; 龙潭组与富稀土层稀土配分图走势相近, 部分可见 Ce 的负异常。

富稀土层相比于深海稀土、山东微山、Mountain Pass、攀西冕宁等矿床而言, 稀土配分模式明显不同; 从高经济价值的中重稀土角度看, 该稀土层富含具有高经济价值的 Pr、Nd、Te、Dy 等元素, 均高于山东微山、攀西冕宁、Mountain Pass 以及深海稀土等矿床, 具有高经济价值潜力。与深海稀土稀土配分特征相对比, 均具有沉积记录的特征, 与其他矿床的稀土配分特征相比, 配分模式明显不同, 是一种具有高经济价值的新类型稀土矿床, 具有非常大的开发潜力。

2.2 成矿条件

(1) 气候条件

贵州晚二叠世位于南半球赤道附近, 季节变



a. 稀土富集层的稀土配分特征以及配分形态；b. 富稀土层与宣威组^[20]、龙潭组^[21]、高钛玄武岩^[15]等地层平均稀土配分模式对比图，用以体现稀土配分模式继承性；c. 峨眉山大火成岩省各岩性稀土配分模式图^[15]；d. 富稀土集与其他矿床平均稀土配分对比

图2 稀土配分

Fig.2 Rare earth distribution

化明显，气候炎热，雨季时间较长，地面径流发育，存在很短暂的无雨季节，气候特征类似于现代的热带雨林气候^[23]。Sr/Cu 以及 CIA 参数、ICV^[5] 指数表明沉积岩石分选性高，玄武岩风化程度较高，间接指示晚二叠世气候环境温暖潮湿。经过长时间的风化作用，加上炎热、雨水充沛的气候条件，使得暴露出来的玄武岩中抗风化能力弱的矿物如辉石长石等矿物中的稀土元素释放，并迁移沉积^[21]。

(2) 物理化学条件

成因矿物学研究表明，高岭石的形成一般为 pH<7 的酸性还原弱氧化条件。研究区普遍出现 Eu 负异常，而 Eu 在还原条件下主要以 Eu²⁺ 存在，易与其他的三价稀土元素发生分离。而以高岭石为主要成分的黏土岩显示当时的沉积环境为偏还原的酸性环境，以此造成了 Eu 的负异常，而

Ce 正负异常均存在，证明富稀土层遭受后期的改造作用（图 2）。

2.3 物质来源

稀土元素基本不受后期风化改造的影响，可以有效地继承其母岩的稀土配分模式（McLennan, 1989）。稀土富集层的稀土配分模式与下伏峨眉山玄武岩的配分模式基本一致，与峨眉山酸性岩稀土配分模式明显不同（图 2a,b），整体呈现右倾的趋势，LREE 富集，具有较高的 LREE/HREE 比值，轻重稀土分异不明显，分馏明显，反映出稀土元素主要物源为峨眉山玄武岩^[24]，同时玄武岩稀土丰度值较高，平均可达 238×10^{-6} ^[25]，也可为富稀土层提供大量来源。田恩源等^[5] 经过 X 粉晶衍射分析，含矿样品中还具有 β-石英以及方钠石，表明沉积物中的母岩来源可能还有酸性火山灰或碱性岩；Zhao 等^[17] 认为峨眉山玄武岩在风化

过程中并不是所有都具有稀土富集的情况，滇黔相邻区的稀土矿化为碱性火山灰的加入，在沉积盆地中沉淀；样品中所赋存的蠕虫状高岭石也证实其风化来源为火山灰原位蚀变而成。

2.4 成矿模式

杨瑞东等^[4]认为稀土富集原因与风化壳密切相关，稀土元素在强烈风化作用过程中释放出来，轻稀土元素易并被风化壳中的高岭石颗粒吸附并富集，而重稀土迁移过程中形成络合物流失；田恩源^[5]等认为成矿母岩在经过风化剥蚀淋滤后搬运至低洼的洪泛平原后，与火山灰一起沉积，在淋滤作用下稀土元素在原地再富集或以类质同象的方式进入晶格；袁民汕等发现稀土元素在碳质黏土岩、碳质页岩中富集程度最高，认为稀土元素在迁移、活化、富集过程中，有机质可能起到了重要作用^[6]；张海等认为玄武岩在风化过程中，难以迁移的稀土元素富集并吸附在黏土矿物表面，经过地壳表面径流作用渗透，最终在全风化-半层中富集，并认为由于峨眉山碱性玄武岩风化壳相对富集轻稀土，而华南花岗岩风化壳富集重稀土，造成两种风化壳的富集类型不一致的原因是成矿母岩酸碱性的区别^[19]。

3 赋存状态

曾励训等^[2]首先指出富稀土层含有离子吸附型稀土。黄训华^[27]通过对威宁鹿房的稀土层进行剖析，认为稀土元素赋存状态为离子吸附型、胶态附着型以及离子胶态混合型；吴承泉^[28]等通过逐级提取实验结果显示稀土元素与磷元素均在残液中，锰铁氧化物、碳酸盐、磷灰石和黏土矿物离子吸附的 REE 含量基本都小于 1%，样品中的 Y 元素在谱图上的特征与磷钇矿特征一致，认为研究区黏土岩中的稀土主要以磷酸盐（磷钇矿、独居石）的形式存在；徐莺等通过对富稀土样品进行 X 衍射实验，未发现独立的稀土矿物，认为

稀土元素可能是以类质同相的形式赋存在黏土矿物中，部分以吸附的形式存在^[29]。张海通过用 2% 的硫酸铵溶液作为浸取剂，对峨眉山风化壳样品分别进行小批量浸出、摇瓶浸出、柱淋洗浸出及搅拌浸出等浸出实验，稀土浸取率均不高，约 31.2%~53.8%，表明呈吸附状态存在的稀土含量较低；用盐酸浓度为变量，温度在 60℃ 条件下，稀土的浸出率为 65.2%~86.4%，远大于硫酸铵的浸取率，表明稀土有一部分是以胶态形式赋存，也指示在酸性条件下，稀土浸出率会升高，其中在稀土元素中 Ce 的浸出率与盐酸浓度呈正相关关系，表明 Ce 元素主要以胶态沉积相赋存；通过微区分布特征发现，La、Ce、Pr、Tb、Dy 及 Sc 等元素富集在黏土矿物中，Er 和 Tm 在黏土矿物中轻微富集，而其他稀土元素则分布较为分散，并配合能谱分析首次发现了磷酸镧矿物颗粒^[19]。

综上，目前对该稀土赋存形式的认识有离子吸附型、胶态附着型、离子胶态混合型、类质同象以及独立矿物磷酸盐类等。赋存状态的巨大争议和不确定性制约了综合利用技术的突破。

4 综合利用方面的研究进展

目前，全球正在开发利用的稀土矿床主要为两类，一是有独立矿物的碳酸岩型、碱性岩型及海滨砂型，载体矿物主要为氟碳铈矿、磷铝铈矿、独居石；二是无独立矿物的风化壳离子吸附型稀土矿（表 1）。

风化壳型稀土矿目前工业上可选择的生产工艺主要是原地浸出工艺和堆浸工艺。原地浸出工艺对矿山水系和植被破坏很小，容易生态恢复，并有效防止山体滑坡等地质灾害的发生。但在没有假底板且有裂缝的稀土矿山，地质结构和地下水系复杂，采用堆浸工艺可以避免稀土浸出液泄漏以及无法回收稀土等问题^[30]。

从矿物学角度分析，宣威组稀土异常出现在

表 1 全球稀土矿床资源量及利用方式

Table 1 Global rare earth deposit resources and utilization methods

平均品位/%	利用率/%	载体矿物	利用方式	资源量/Mt	LREE/ HREE	Ref.
离子吸附型 HREE:0.08 LREE:0.1	70~75	风化壳淋积型稀土矿	地浸法、堆浸法	207.23	3.32~22.31	[1,34]
深海稀土 (太平洋)	0.66	生物磷酸盐 (鱼牙骨)	酸浸	>16000	9.24	[35]
攀西冕宁	3.7	氟碳铈矿	重选—浮选工艺流程	340	24.55~45.54	[36]
Mountain Pass	8	氟碳铈矿	羟肟酸加温浮选	20	30.05	[37]
白云鄂博	4.7	氟碳铈矿、独居石	弱磁-强磁-稀土浮选-萤石浮选 (加温)	5740	123.16~259.93	[38]
山东微山	3.5~5	氟碳铈矿	浮选	270	11.21~70.32	[39]
滇黔相邻区	0.27	高岭石	焙烧-选择性酸浸	>40	5.93~20.75	[5]

高岭石质黏土岩中，高岭石含量介于 60%~80%^[31]，但又不同于离子吸附型稀土，稀土元素并不以离子交换和配位络合吸附于高岭石、埃洛石表面^[32]，因为用传统的铵盐体系及硫酸体系浸出工艺，此稀土在常温条件下的直接浸出率极低（0.02%~24%）^[33]。

5 研究方向及建议

虽然诸多学者对于滇黔相邻区的富稀土黏土岩中稀土元素的物质来源，成矿条件，稀土元素活化-迁移-富集过程及分布规律等开展过大量研究，但仍然存在较大的争议。目前来看，该区宣威组稀土极有希望成为我国新一个稀土资源勘查开发基地，保障我国稀土资源安全，并成为我国定义和发现的继离子型稀土之后的新一个稀土矿床类型。所以，成矿理论的研究需要持续跟进和突破，丰富和拓展稀土成矿理论。

综合已有研究，宣威组富稀土黏土岩中稀土元素的赋存状态主要包含以下几类：一是稀土元素主要由离子吸附相和富含稀土元素的残余独立矿物相组成，与高岭石等黏土矿物含量密切相关^[17]；二是稀土以类质同象为主，含离子吸附相（约 20%）两种形式赋存于高岭石质黏土岩中^[29]；三是高岭石硬质黏土岩中包含离子吸附态、胶体吸附态等的混合态稀土^[28]。与南方离子吸附型稀土的矿物组成基本一致，稀土品位与高

岭石（60%~80%）含量呈明显的正相关关系，稀土元素至少有三种以上的赋存状态：独立矿物态（<1%），类质同象态（<1%），离子吸附态（0.02%~24%），尚有 75% 以上的稀土赋存状态没有查清。破解稀土元素与黏土岩之间的关系，是查明其赋存状态的关键，也能为此类稀土的富集机理研究，综合利用技术突破提供理论依据。

宣威组富稀土黏土岩中稀土含量约为 $355 \times 10^{-6} \sim 1986 \times 10^{-6}$ ，平均 839×10^{-6} ，且伴生有铝、铌、锆、镓、钛等元素。目前来看，“一种选择性浸出沉积型稀土矿的方法”的专利方法能将稀土元素浸出率提升至 87.88%，但焙烧成本过高，无法投入到工业生产。稀土的绿色高效浸出，伴生元素的综合利用及尾矿的资源化消解是下一步综合利用亟待解决的关键科学问题。

参考文献：

- [1] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2):106-111.
- ZHAI M G, WU F Y, HU R Z, et al. Critical metal minerals resources: current research status and scientific issue[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2):106-111.
- [2] 曾励训. 贵州西部发现离子吸附型稀土矿[J]. 贵州地质, 1989(3):272.
- ZENG L X. Discovery of ion adsorbed rare earth ore in Western Guizhou[J]. Guizhou Geology, 1989(3):272.
- [3] 代世峰, 任德贻, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8):1707-

1715.
DAI S F, REN D Y, ZHOU Y P, et al. Coal-hosted rare metal deposits: Genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8):1707-1715.
[4] 杨瑞东, 鲍森, 廖珏, 等. 贵州西部中、上二叠统界线附近风化壳类型及成矿作用[J]. *矿物学报*, 2007(01):41-48.
YANG R D, BAO M, LIAO L, et al. Ancient weathering crust and its mineralization near the middle-upper Permian boundary in western Guizhou Province[J]. *Acta mineralogica Sinica*, 2007(01):41-48.
[5] 田恩源, 龚大兴, 赖杨, 等. 贵州威宁地区沉积型稀土含矿岩系成因与富集规律[J]. *地球科学*, 2021, 46(8):2711-2731.
TIAN E Y, GONG D X, LAI Y, et al. Genesis and enrichment of sedimentary rare earth in Weining area, Guizhou Province[J]. *Earth Science*, 2021, 46(8):2711-2731.
[6] 袁民汕, 蔡国盛, 曾道国, 等. 贵州西部二叠系峨眉山玄武岩顶部古风化壳铈-铌-稀土矿化富集层的发现与意义[J]. *矿物学报*, 2021, 41(Z1):531-547.
GUN M S, CAI G S, ZENG D G, et al. Discovery and significance of the Sc-Nb-REE-enriched zone in the paleocrust of weathering a top the Permian Emeishan basalt in the western Guizhou, China[J]. *Acta mineralogica Sinica*, 2021, 41(Z1):531-547.
[7] 龚大兴. 贵州毕节-六盘水地区能源资源基地综合地质调查项目成果报告[R]. 成都: 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 2021.
GONG D X. Report of comprehensive geological survey of energy resource base in Bijie-Liupanshui, Guizhou Province[R]. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. 2021.
[8] 张海. 黔西北地区稀土矿床地质地球化学特征及其成矿机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
ZHANG H. Geological and geochemical characteristic and metallonetic mechanism of REE deposit, Northwestern Guizhou[D]. Chengdu University of technology, 2014.
[9] 陶平, 陈建书, 陈启飞, 等. 关于贵州省成矿区带的划分方案[J]. *贵州地质*, 2018, 136(3):171-180+217.
TAO P, CHEN J S, CHEN Q F, et al. Division scheme about the metallogenic zones of Guizhou Province[J]. *Guizhou Geology*, 2018, 136(3):171-180+217.
[10] 林建英. 中国西南三省二叠纪玄武岩系的时空分布及其地质特征[J]. *科学通报*, 1985(12):929-932.
LIN J Y. Spatial distribution and geological characteristics of the Permian Emeishan basalts in SW China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1985(12):929-932.
[11] 郭佩佩, 张海, 刘军, 等. 黔西北地区二叠纪玄武岩古风化壳常量元素的地球化学特征[J]. *中国地质调查*, 2017, 4(1):39-44.
GUO P P, ZHANG H, LIU J, et al. Geochemical characteristics of paleo-weathering crust of Permian basalt in Northwestern Guizhou[J]. *Geological Survey of China*, 2017, 4(1):39-44.
[12] 陈雷, 支霞臣, 张招崇, 等. 云南丽江苦橄岩 Re-Os 同位素地球化学初步研究[J]. *高校地质学报*, 2007(2):337-343.
CHEN L, ZHI X C, ZHANG Z C, et al. Preliminary study on Re-Os isotope geochemistry of picrites from Lijiang Area, Yunnan Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007(2):337-343.
[13] Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the Western Emeishan large igneous province, SW China: implications for plume-lithosphere interaction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 228(3-4):525-546.
[14] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. *地球化学*, 2001, 30(1):1-9.
XU Y G, Zhong S L. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions[J]. *Geochimica*, 2001, 30(1):1-9.
[15] 孙平原, 何碧, 赵飞, 等. 贵州乌蒙山黔西地区二叠系玄武岩地球化学特征及其地质意义[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(12):41-51.
SUN P Y, HE B, ZHAO F, et al. Geochemical characteristics and their geological significance of Permian basalt rocks in the Qianxi Area, Wumengshan of Guizhou Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(12):41-51.
[16] 肖加飞, 熊小辉, 付绍洪. 贵州峨眉山玄武岩东部边缘带岩石地球化学特征及其有关的成矿作用[J]. *矿物学报*, 2011, 31(S1):177-178.
XIAO J F, XIONG X H, FU S H. Petrogeochemical characteristics and related mineralization of the eastern marginal zone of Emeishan basalt in Guizhou Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(S1):177-178.
[17] Zhao L, Dai S, Graham I, et al. Clay mineralogy of coal-hosted Nb-Zr-REE-Ga mineralized beds from Late Permian Strata, Eastern Yunnan, SW China: implications for paleotemperature and origin of the micro-quartz[J]. *Minerals*, 2016, 6(2).
[18] Dai S, Zhou Y, Zhang M, et al. A new type of Nb

- (Ta)-Zr(Hf)-REE-Ga polymetallic deposit in the late Permian coal-bearing strata, eastern Yunnan, Southwestern China: possible economic significance and genetic implications[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 83(1):55-63.
- [19] 张海, 郭佩佩, 杨国彬. 贵州西部峨眉山玄武岩风化壳中稀土元素赋存状态研究[J]. 中国稀土学报: 1-13.
- ZHANG H, GUO P P. REE occurrence in the Emeishan basalt weathering crust of Western Guizhou[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*: 1-13.
- [20] 陈国勇, 范玉梅, 孟昌忠, 等. 贵州威宁-赫章二叠系乐平统含铁、铝岩系沉积环境及成矿元素富集特征分析[J]. 地质与勘探, 2017, 53(2):237-246.
- CHEN G Y, FAN G M, MENG C Z, et al. Sedimentary environments and mineral element concentration features of iron-aluminum-bearing rock series in the Leping Series of Permian of the Weining-Hezhang Area, Guizhou[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(2):237-246.
- [21] 鲍淼. 贵州六盘水地区晚二叠世龙潭组煤系地层中瓦斯富集规律的研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2007.
- BAO M. Study on distribution of methane in the Late Permian coal-bearing strata in Shuicheng-Panxian-Luzhi, Guizhou Province, China[D]. Guizhou: Guizhou University, 2007.
- [22] 梁宇馨, 李红, 张冬冬, 等. 四川盆地华蓥山峨眉山玄武岩地球化学特征及其成因分析[J]. 地质科学, 2021, 56(1):288-302.
- LIANG Y X, LI H, ZHANG D D, et al. Geochemical characteristics and genetic analysis of Huayingshan Emeishan basalt in Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(1):288-302.
- [23] 郭英廷. 贵州西部晚二叠世古气候[J]. 中国煤田地质, 1990(3):22-24+2.
- GUO Y T. Late Permian paleoclimate of Western Guizhou[J]. *China coal geology*, 1990(3):22-24+2.
- [24] 王强, 杨瑞东, 鲍淼. 贵州毕节地区煤层中稀土元素在含煤地层划分与对比中应用探讨[J]. 沉积学报, 2008(1):21-27.
- WANG Q, YANG R D, BAO M. Discussion on the role of REE in stratigraphic and correlation in coal measures from Bijie Area, Guizhou Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008(1):21-27.
- [25] 毛德明, 张启厚, 安树仁. 贵州西部峨眉山玄武岩及有关矿产[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1992: 1-152.
- MAO D M, ZHANG Q H, AN S R. Emeishan basalt and minerals of Western Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press 1992: 24-3.
- [26] 徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 2001, 30(1):1-9.
- XU Y G, ZHONG S L. The Emeishan large igneous province: evidence for mantle plume activity and melting conditions[J]. *Geochimica*, 2001, 30(1):1-9.
- [27] 黄训华. 威宁鹿房稀土矿地质特征及成矿作用初步分析[J]. 贵州地质, 1997(4): 328-333.
- HUANG X H. The Lufang rare earth deposit in Weining, Western Guizhou and its mineralization. *Guizhou Geology*, 1997(4): 328-333.
- [28] 吴承泉, 张正伟, 秦海波, 等. 贵州西部宣威组粘土岩稀土元素赋存状态和富集规律[C]. 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会, 2019: 2.
- WU C Q, ZHANG Z W, QIN H B, et al. Occurrence state and enrichment regularity of rare earth elements in clay rocks of Xuanwei Formation, western Guizhou[C]. The 9th National Symposium on metallogenic theory and prospecting methods, 2019: 2.
- [29] 徐莹, 戴宗明, 龚大兴, 等. 贵州某地二叠系宣威组富稀土岩系稀土元素赋存状态研究[J]. 矿产综合利用, 2018(6):90-94+101.
- XU Y, DAI Z M, GONG D X, et al. Study on the occurrence state of rare earth elements of rare earth enriched rocks in the Permian Xuanwei Formation in Guizhou Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(6):90-94+101.
- [30] 程建忠, 车丽萍. 中国稀土资源开采现状及发展趋势[J]. 稀土, 2010, 31(2):65-69+85.
- CHENG J Z, CHE L P. Current mining situation and potential development of rare earth in China[J]. *Chinese Rare Earths*, 2010, 31(2):65-69+85.
- [31] 徐璐. 一种选择性浸出沉积型稀土矿的方法: 中国, ZL201811407361.2[P], 2020-04-24.
- XU L. A method for selective leaching of sedimentary rare earth ore: China, ZL201811407361.2[P], 2020-04-24.
- [32] Yang M, Liang X, Ma L, et al. Adsorption of REEs on kaolinite and halloysite: A link to the REE distribution on clays in the weathering crust of granite[J]. *Chemical Geology*, 2019, 525:210-217.
- [33] He P, He M, Zhang H. State of rare earth elements in the rare earth deposits of Northwest Guizhou, China[J]. *Acta Geochimica*, 2018, 37(6):867-874.
- [34] 陈蕤, 周剑飞, 葛枝华, 等. 黔西威宁地区玄武岩风化壳稀土赋存状态与浸出实验[J]. 矿物学报, 2019, 39(4):380-

388. CHEN R, ZHOU J F, GE Z H, et al. A study on the occurrence state and leaching experiment of REE in basalt weathering crusts in the Weining District, Western Guizhou[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2019, 39(4):380-388.
- [35] 张臻悦, 何正艳, 徐志高, 等. 中国稀土矿稀土配分特征[J]. *稀土*, 2016, 37(1):121-127.
- ZHANG Z Y, HE Z Y, XU Z G, et al. Rare earth partitioning characteristics of China rare earth ore[J]. *Chinese Rare Earth*, 2016, 37(1):121-127.
- [36] 方明山, 石学法, 肖仪武, 等. 太平洋深海沉积物中稀土矿物的分布特征研究[J]. *矿冶*, 2016, 25(5):81-84.
- FANG M S, SHI X F, XIAO Y W, et al. Research on discussion characteristics of rare earth mineral of deep sea sediments in the pacific ocean[J]. *Mining & Metallurgy*, 2016, 25(5):81-84.
- [37] 许成, 黄智龙, 刘丛强, 等. 四川牦牛坪稀土矿床碳酸岩地球化学[J]. *中国科学 (D 辑:地球科学)*, 2002(8):635-643.
- XU C, HUANG Z L, LIU C Q, et al. Geochemistry of carbonate rocks in Maoniuping REE deposit[J]. *Science China(Earth Sciences)*, 2002(8):635-643.
- [38] Weng Z, Jowitt S M, Mudd G M, et al. A detailed assessment of global rare earth element resources: opportunities and challenges[J]. *Economic Geology*, 2015, 110(8):1925-1952.
- [39] 赖小东. 内蒙古白云鄂博 REE-Nb-Fe 矿床成因问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- LAI X D. Study of genesis of Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [40] 周伟伟, 蔡剑辉, 阎国翰. 山东郯山碱性杂岩体地球化学特征及其意义[J]. *西北地质*, 2013, 46(04):93-105.
- ZHOU W W, CAI J H, YAN G H. The geochemical characteristic and geological significance of alkaline complex in Xishan of Shandong Province[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(04):93-105.

The Research Progress and Problems of Rare Earth Elements of Rare Earth Rich Clay Rock Permian Xuanwei Formation in the Yunnan-Guizhou Border Region

Jiang Xiaoli¹, Gong Daxing¹, Zhou Jiayun¹, Lai Yang¹, Chao Wenwen²

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences Technology Innovation Center of Rare Earth Resources Development and Utilization, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: A set of rare earth rich clay rocks is widely distributed in the lower part of The Permian Xuanwei Formation and upper the Emeishan basalt in the Yunnan-Guizhou border region. As a new type potential rare earth deposit, researchers have studied it and got great progress, including metallogenic conditions, occurrence state, enrichment regulation, multipurpose utilization methods and so on. This new type deposit holds giant resource potential, great regional continuity, high concentration, enrich high value rare earth element, such as Pr, Nd, Td, Dy, and economic value and large potential of development and utilization. This paper summarizes the current research progress and key problems of rare earth in rare earth rich clay rock, Xuanwei Formation, and discusses the next research direction. At present, there has not defined on the enrichment mechanism of rare earth elements in rare earth rich clay rock, xuanwei Formation, and further research on metallogenic theory is the key to breakthrough in prospecting. It is urgent to make a breakthrough in the study of occurrence state, which is of great significance for the comprehensive utilization of this new type of rare earth. In terms of comprehensive utilization, economically feasible green beneficiation and smelting technology, comprehensive recovery of associated valuable elements Al, Nb, Zr and Ga, and reclamation and absorption of tailings are the main directions for the next step.

Keywords: New-type deposit; Yunnan -Guizhou Border Region; Xuanwei formation; enrichment mechanism; multipurpose utilization potential