

doi: 10.12029/gc20220609

赖杨, 龚大兴, 秦建华, 田恩源, 惠博, 徐璐, 高泽东. 2022. 滇东—黔西沉积型稀土: 一种新类型稀土资源及其开发利用潜力[J]. 中国地质, 49(6): 1823–1833.

Lai Yang, Gong Daxing, Qin Jianhua, Tian Enyuan, Hui Bo, Xu Lu, Gao Zedong. 2022. Sedimentary rare earth in the eastern Yunnan and western Guizhou: A new genetic type and potential of development and utilization[J]. *Geology in China*, 49(6): 1823–1833(in Chinese with English abstract).

滇东—黔西沉积型稀土: 一种新类型稀土资源及其开发利用潜力

赖杨^{1,2}, 龚大兴^{1,2}, 秦建华¹, 田恩源^{1,2}, 惠博¹, 徐璐^{1,2}, 高泽东³

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 四川 成都 610041; 3. 金川集团股份有限公司选矿厂, 甘肃 金昌 737100)

提要:【研究目的】稀土是重要的自然资源, 更是宝贵且关键的战略资源。本文通过对滇东—黔西地区沉积型稀土资源野外地质调查及室内综合研究, 揭示了该稀土资源的优势及开发利用潜力, 既丰富了全球稀土资源工业类型, 又支撑了国家关键稀土资源战略储备。【研究方法】本文基于对含矿地层特征、典型矿石特征、稀土元素配分特征以及稀土资源潜力等方面的研究, 探讨该稀土资源的成因类型、稀土元素赋存状态以及开发利用潜力。【研究结果】查明含矿地层为二叠系上统宣威组(P_{3x}); 富稀土矿石的岩性为灰白色铝土质黏土岩和粉砂质黏土岩; 其成因属沉积型; 在威宁县黑石头—麻乍—哲觉地区, 矿体厚度 2~18 m 不等, 矿体延伸较连续, 稀土氧化物(TREO)含量最高达 1.6%, 矿体块段稀土(TREO)加权平均品位为 0.18%~0.46%, 推断资源量超 30 万 t; 该稀土资源中“关键稀土元素(CREE)”占比高达 22.6%(以∑CREO计), 高于国内外大多数正在开发利用的稀土矿; 针对该稀土资源研发了“选择性浸出”新工艺, 使稀土回收率达 90%以上, 该稀土资源有望实现规模化工业利用。【结论】该沉积型稀土资源具有矿体厚度大、矿石品位高、资源潜力大、开采成本低、矿石中关键稀土元素(CREO)占比高、开发利用前景好等优点。

关键词: 沉积型稀土矿床; 稀土元素; 开发利用潜力; 矿产勘查工程; 滇东; 黔西

创新点: 估算出威宁县黑石头—麻乍—哲觉地区稀土矿推断资源量超 30 万 t; 对比研究该稀土资源中“关键稀土元素(CREE)”含量, 突显其潜在价值大; 通过综合研究, 认为该沉积型稀土资源开发利用潜力巨大, 同时丰富了全球稀土资源工业类型。

中图分类号: P618.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2022)06-1823-11

Sedimentary rare earth in the eastern Yunnan and western Guizhou: A new genetic type and potential of development and utilization

LAI Yang^{1,2}, GONG Daxing^{1,2}, QIN Jianhua¹, TIAN Enyuan^{1,2}, HUI Bo¹, XU Lu^{1,2}, GAO Zedong³

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Technology Innovation Center of Rare Earth Resources Development and Utilization, China Geological Survey, Chengdu

收稿日期: 2020-10-18; 改回日期: 2021-03-14

基金项目: 中国地质调查局“滇黔相邻区稀土资源基地综合地质调查”项目(DD20211236)资助。

作者简介: 赖杨, 男, 1987 年生, 硕士, 工程师, 从事矿物学、区域地质矿产调查与研究工作; E-mail: 772459504@qq.com。

通讯作者: 龚大兴, 男, 1986 年生, 博士, 高级工程师, 从事沉积学、区域地质矿产调查与研究工作; E-mail: 113652192@qq.com。

610041, Sichuan, China; 3. Mineral Processing Plant of Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang 737100, Gansu, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Rare earth is not only important natural non-renewable resources, but also a key strategic resource. Based on the field geological survey and indoor comprehensive study of sedimentary rare earth resources in the eastern Yunnan and western Guizhou area, this paper reveals the advantages and development and utilization potential of the rare earth resources, which not only enriches the industrial types of the global rare earth resources, but also supports the national strategic reserve of key rare earth resources. **[Methods]** Based on the research on the characteristics of ore-bearing strata, typical ore characteristics, the partition characteristics of rare earth elements and the potential of rare earth resources, this paper discusses the genetic types of the rare earth resources, the occurrence state of rare earth elements and the potential of development and utilization. **[Results]** The ore-bearing stratum is identified as Xuanwei Formation of Upper Permian (P_{3x}); the lithology of rare-earth rich ore is gray-white aluminite claystone and silty claystone; the origin of rare earth ore belongs to sedimentary type; in Weining County Heishitou—Mazha—Zhejue area, the thickness of ore body varies from 2 m to 18 m, the ore body extension is relatively continuous, the content of rare earth oxide (TREO) is up to 1.6%, the weighted average grade of ore body block (TREO) is 0.18% to 0.46%, and the inferred resource is over 300,000 tons; the proportion of "Critical rare earth elements (CREE)" in the rare earth resources is up to 22.6% (Σ CREE), which is higher than most of the rare earth deposits under development and utilization at domestic and overseas. In addition, the new selective leaching technology is used in the dressing and metallurgy test, and the results indicate that the recovery of rare earth can reach more than 90%. This new type of rare earth mine is expected to realize large-scale industrial utilization. **[Conclusions]** The sedimentary rare earth resource has the advantages of large ore thickness, high ore grade, large resource potential, low mining cost, high proportion of critical rare earth elements (CREE) in ore, and good development and utilization prospect.

Key words: sedimentary rare earth deposit; rare earth elements; potential of development and utilization; mineral exploration engineering; Eastern Yunnan; Western Guizhou

Highlights: Estimate the rare earths inferred resource of more than 300000 tons in Weining County Heishitou—Mazha—Zhejue area. Highlights its potential value, based on the comparative study on the content of "Critical rare earth elements (CREE)" in this rare earth resource. Through comprehensive study, it is concluded that this sedimentary rare earth resource has great potential for exploitation and utilization, and enriches the global rare earth resource industrial types.

About the first author: LAI Yang, male, born in 1987, master, engineer, engaged in mineralogy, regional geological and mineral survey and research; E-mail: 772459504@qq.com.

About the corresponding author: GONG Daxing, male, born in 1986, Ph.D., senior engineer, engaged in sedimentology, regional geology and mineral resources survey and research work; E-mail: 113652192@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey "Comprehensive Geological Survey of Rare Earth Resource Bases in the Adjacent Areas of Yunnan and Guizhou" (No.DD20211236).

1 引 言

稀土(Rare earth)是元素周期表中镧系元素和钪、钇共17种金属元素的总称。稀土是重要的自然资源,更是宝贵且关键的战略资源,在民用和军事方面用途十分广泛,同时也是先进装备制造业、新能源、新兴产业等高新技术产业不可或缺的原材料。在全球范围内,稀土资源分布不均,其主要分布于美国、俄罗斯、中国、印度、巴西等国家。中国稀土储量约占世界总储量的23%,却承担了世界90%以上的市场供应(中华人民共和国国务院新闻

办公室,2012)。经半个多世纪的过度开采,中国稀土资源保有储量及保障年限不断下降,鉴于此,发现和利用新类型稀土矿,可有效提高中国稀土资源储量,有力保障国家稀土资源供给安全。

稀土矿床按成因分类主要有碱性岩—碱性超基性岩型、碳酸岩型、花岗岩型、砂矿型以及风化壳型(徐光宪,1995);按工业类型分类主要有稀土-磁铁矿矿床、含稀土碳酸岩矿床、花岗岩风化壳型稀土矿床、含稀土伟晶岩矿床、含稀土磷块岩矿床以及独居石砂矿床(矿产资源工业要求手册,2014)。近年来,多位学者报道在贵州威宁地区二叠系宣威

组一段黏土岩中富含稀土元素,但是由于该稀土资源的综合利用技术多年来未取得突破(黄训华, 1997; 张震和戴朝辉, 2010; 周灵洁, 2012), 稀土元素的赋存状态、富集机理以及稀土矿床成因类型等方面存在较大争议。2018年以来, 笔者在滇东—黔西地区开展地质调查, 发现研究区内广泛发育的二叠系宣威组富稀土黏土岩系属沉积成因, 有别于 Wang et al. (2018) 提及的南方离子吸附型稀土矿, 而类似于文俊等(2021)报道的川南沐川地区宣威组底部古风化壳—沉积型铈、稀土矿, 该新类型稀土矿具有矿石禀赋好、矿层厚度大且较连续、“关键稀土元素(Critical rare earth element; Pr, Nd, Tb, Dy)”占比较高等特点, 并伴生有铈、锆、镓等有价值元素, 其中镓的平均品位高达 70.5×10^{-6} , 高于工业品位(Zhang et al., 2010)。另外, 在稀土资源开发利用方面取得了重大突破, 针对该稀土资源研发了“选择性浸出”新工艺(徐璐等, 2020), 使稀土回收率可达90%以上, 该新类型稀土资源有望实现规模化工业利用。滇东—黔西地区沉积型稀土资源的发现与利用, 将有力支撑国家关键稀土资源战略储备。

2 区域地质背景

滇东—黔西地区大地构造位置位于扬子板块西缘(潘桂棠等, 2009), 以北西向康定—水城断裂、北东向弥勒—师宗深大断裂带以及近南北向小江断裂所挟持的三角形地带(图1)。区内地层属华南地层大区的扬子地层区之上扬子地层分区, 主体位于黔西北地层小区, 部分涉及到云南的昭通地层小区及曲靖地层小区。晚中生代以前主要是海相碳酸盐岩及陆源硅质碎屑岩, 以后则主要为陆相沉积。火成岩主要为海西晚期陆相溢流的峨眉山玄武岩及同源异相的浅成侵入岩。

3 测试分析方法

在研究区内采集了186件宣威组一段沉积型稀土矿石样品, 正样经破碎研磨至200目, 取缩分样50 g/件, 送至中国地质科学院矿产综合利用研究所分析测试中心, 利用电感耦合等离子体质谱仪(Perkinelmer Optima Nexion 350X)测得稀土配分数据; 再取稀土含量(TREO)较高的毛家坪矿点、鱼布沟矿点缩分样20 g/件, 送至中国地质科学院矿产综

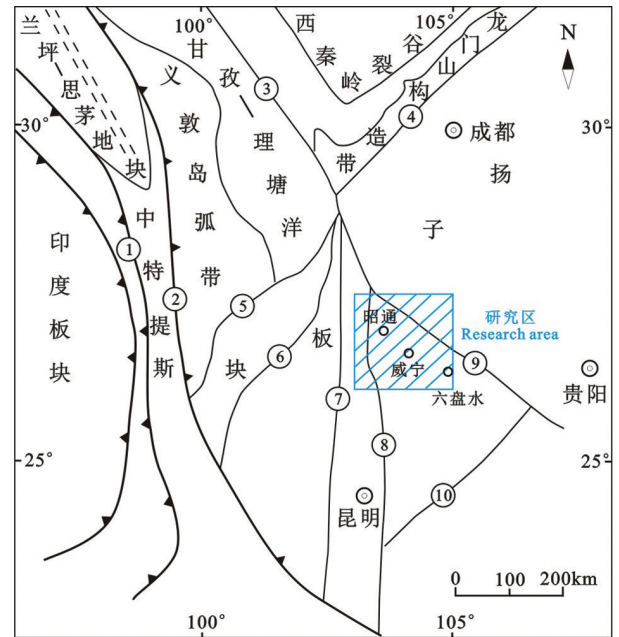


图1 研究区大地构造位置图(据骆耀南, 1985; 张志斌等, 2006)
①—怒江断裂; ②—金沙江—红河断裂; ③—鲜水河断裂; ④—龙门山山前断裂; ⑤—小金河断裂; ⑥—笮河—程海断裂; ⑦—安宁河—绿汁江断裂; ⑧—小江断裂; ⑨—康定—水城断裂; ⑩—弥勒—师宗断裂
Fig.1 Sketch map showing geotectonic position of the research area (after Luo Yaonan, 1985; Zhang Zhibin et al., 2006)

①—Nujiang fault; ②—Jinsha River—Red River fault; ③—Xian Shui River fault; ④—Longmen Mountain piedmont fault; ⑤—Xiao Jian River fault; ⑥—Jing River—Chenghai fault; ⑦—Anning River—Lü zhi River fault; ⑧—Xiao River fault; ⑨—Kang ding—Shui cheng fault; ⑩—Mile—Shizong fault

合利用研究所岩石与工艺矿物学研究室, 利用X射线衍射仪(日本理学Ultima IV)测得主要矿物成分。选取稀土含量(TREO)较高的毛家坪矿点、鱼布沟矿点矿石副样, 块样用切割机(Mecatome-T330)切成 $3 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 样品, 用环氧树脂镶嵌制光片坯样; 松散样经研磨至40目, 用环氧树脂镶嵌制砂片坯样。以上坯样用自动磨抛机(Ecome-T300)制得直径为3.5 cm圆柱形待测样品, 将待测样品送至中国地质科学院矿产综合利用研究所岩石与工艺矿物学研究室, 利用英国蔡司(ZEISS) Sigma 500型场发射扫描电镜及配套的德国布鲁克能谱仪(EDS)获取数据, 并应用矿物特征自动定量分析软件(AMICS)进行矿物参数全自动定量分析。

4 稀土资源特征

4.1 富稀土岩系特征

研究区内富稀土岩系发育于二叠系宣威组一

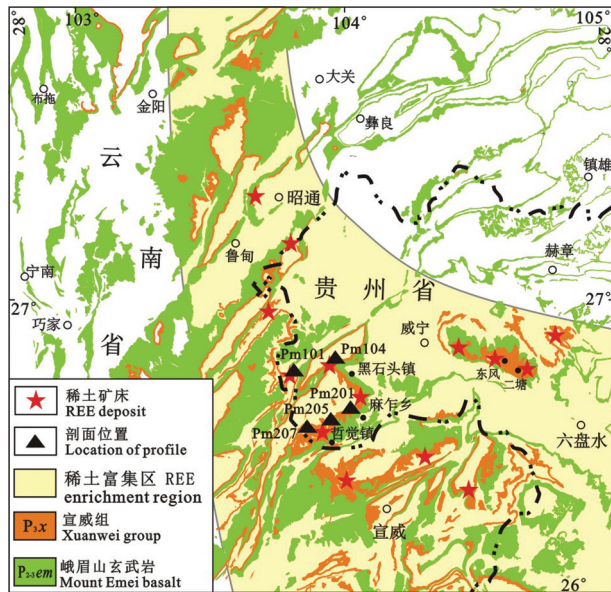


图2 研究区地质简图

Fig.2 Sketch Geological map of the study area

段(P_{3x})。宣威组出露面积较广(图2),北至昭通金阳—大关一带,向南经昭通、威宁一直延伸至宣威—六盘水等地,呈北窄南宽的形态展布。宣威组平行不整合于二叠系峨眉山玄武岩组(P_{2-3em})之上、整合于三叠系东川组(T_{1dc})之下,是一套乐平世滨岸及湖沼相与同期曲流河相伴生产出的沉积地层,并且多出现在河泛平原背景上,无独立的大型湖泊沉积体系(戴传固, 2017)。

据笔者对威宁县哲觉镇小箐沟(东经 $103^{\circ}59'08''$,北纬 $26^{\circ}36'37''$)二叠系宣威组一段典型地层剖面(Pm201)研究,查明宣威组一段富稀土岩系主要为灰白色铝土质黏土岩与粉砂质黏土岩互层(图3a、b),偶见植物碎屑,中部夹砾屑砂岩(图3f),砾屑呈次圆状,粒度2~4 mm不等,由下往上砾屑粒度表现出粗—细—粗的渐变特征;岩石碎裂呈砂状、松散片状(图3c),局部可见层理构造;稀土含量较高的岩石主要为铝土质黏土岩(图3d、e)、粉砂质黏土岩(⑨~⑪层,⑬~⑮层)。

4.2 矿石特征

研究区沉积型稀土矿石主要为深灰—灰白色铝土质黏土岩(图3c、d、e),具微细粒—隐晶质结构、鳞片状、块状构造。据偏光显微镜、X射线衍射仪、扫描电镜(图4a)、AMICS矿物分析系统等仪器综合测试分析,结果显示矿石由黏土矿物(高岭石≈

83%、埃洛石≈2%、伊利石<1%、绿泥石<1%)、金属氧化物(锐钛矿≈5%、褐铁矿≈1%、磁铁矿<1%、水铝石<1%)、硅酸盐矿物(石英+蛋白石<4%、火山玻璃≈2%)、金属硫化物(黄铁矿≈0.2%)以及其他方解石、针铁矿等微量矿物组成(徐莺等, 2018)。另外,偶见极少量的氟碳铈矿(图4b)、方铈矿、磷铝铈矿等独立稀土矿物,其总含量<0.1%;以及少量锆石、磷灰石、金红石等含稀土元素的非独立稀土矿物,其总含量<1%。

4.3 稀土资源潜力

本文作者在研究区内优选二叠系宣威组(P_{3x})出露较好的区域,通过32个探槽工程、6个剥土工程地表控制及22个钻探工程深部验证,初步查明研究区二叠系宣威组(P_{3x})一段稀土矿层厚度2~18 m不等,单个矿石样品TREO含量最高为1.6%,圈定三处稀土矿找矿靶区(图5):

(1) I号找矿靶区:该靶区矿体形态呈层状、似层状,圈定一个矿体,矿体倾角 26° ~ 31° ,矿体厚度2.96~18.92 m,矿体在地表出露较连续,沿走向延伸可达8 km,矿体TREO加权平均品位为0.21%(边界品位:0.18%,下同),该找矿靶区内推断资源量约4万t,矿床规模达小型。

(2) II号矿找矿靶区:该靶区矿体形态呈层状、似层状,共圈定出上下两个矿层、三个矿体,矿体倾角 12° ~ 17° ,矿体TREO加权平均品位0.23%~0.39%,矿体厚度5.85~9.23 m,其中主矿体沿倾向延伸可达1.6 km,该找矿靶区内推断资源量约25万t,矿床规模达中型,并具有达大型的潜力。

(3) III号找矿靶区:该靶区矿体形态呈层状、似层状,共圈定出上下两个矿层、十个矿体,矿体倾角 4° ~ 10° 不等,矿体TREO加权平均品位0.18%~0.46%,矿体厚度1.29~2.99 m。其中主矿体在地表出露连续,深部钻探控制也较稳定,沿倾向延伸可达2 km,该找矿靶区内推断资源量约2万t,矿床规模为小型。

综上所述,该区稀土资源规模大,矿体埋藏浅,产状较缓且连续,有利于大规模露天开采。

笔者在研究区内、找矿靶区以外的昭通、鲁甸、威宁炉山—东风—二塘、六盘水大湾、宣威大井等地(图2),采集了宣威组一段铝土质黏土岩样品,分析结果显示均有稀土矿化异常,十余处稀土TREO品位

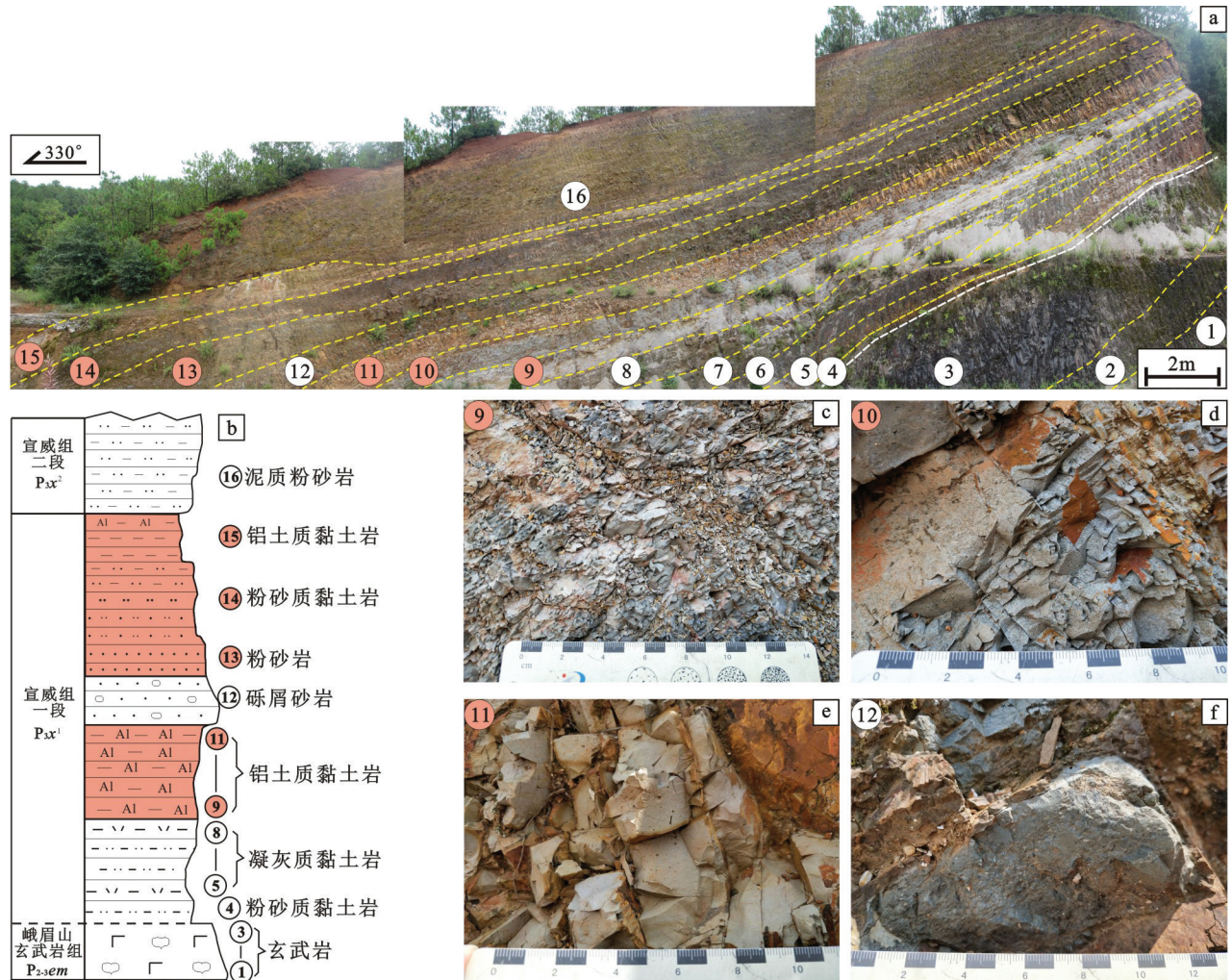


图3 贵州威宁哲觉镇宣威组一段(P_{3x1})剖面-柱状图

a—宣威组一段典型剖面;b—宣威组一段柱状图;c、d、e—铝土质黏土岩;f—砾屑砂岩

Fig.3 Typical profile and histogram of the first part of Xuanwei Group (P_{3x1}) in the Zhejue town of Weining area, Guizhou Province

a—Typical section of the first part of Xuanwei Group; b—Histogram of the first passage of Xuanwei Group; c, d, e—Bauxitic clay rock; f—Gravel sandstone

超0.1%,最高品位0.42%,算数平均品位0.2%,矿体出露厚度2~6 m不等,推测滇东—黔西地区沉积型稀土资源找矿潜力巨大,远景资源量超100万t。

4.4 稀土配分及资源对比

物源区岩石经风化剥蚀形成的碎屑物质再搬运至沉积区沉积成岩,通常沉积岩继承了物源区岩石的稀土配分特征,风化和成岩作用对沉积岩中稀土元素再分配影响不大(McLennan, 1993),所以稀土可作为一种有效的示踪物质。

在研究区内优选4条宣威组典型剖面(Pm101、Pm104、Pm205、Pm207),逐层采集岩石样品,分别按玄武岩、铁质黏土岩、铝土质黏土岩、黏土质粉砂

岩、炭质黏土岩和砾岩进行稀土元素球粒陨石标准化,从稀土配分模式(图6)可以看出宣威组富稀土岩系中所有样品均与峨眉山玄武岩均具有相对富集轻稀土元素、亏损重稀土元素、呈现右倾模式的特征;不同的是,大部分铁质黏土岩、黏土质粉砂岩与玄武岩具有更加相近的配分模式,即都只表现出轻微的负Eu异常;而铝土质黏土岩层作为主要的含矿层却表现为明显的负Eu异常(田恩源等, 2020)。

滇东—黔西地区沉积型稀土矿石中关键稀土元素(CREO)高于国内正在开发利用的四川冕宁碳酸岩型、白云鄂博碳酸岩型、山东微山碳酸岩型以及部分南方离子吸附型等大型、超大型稀土矿床,

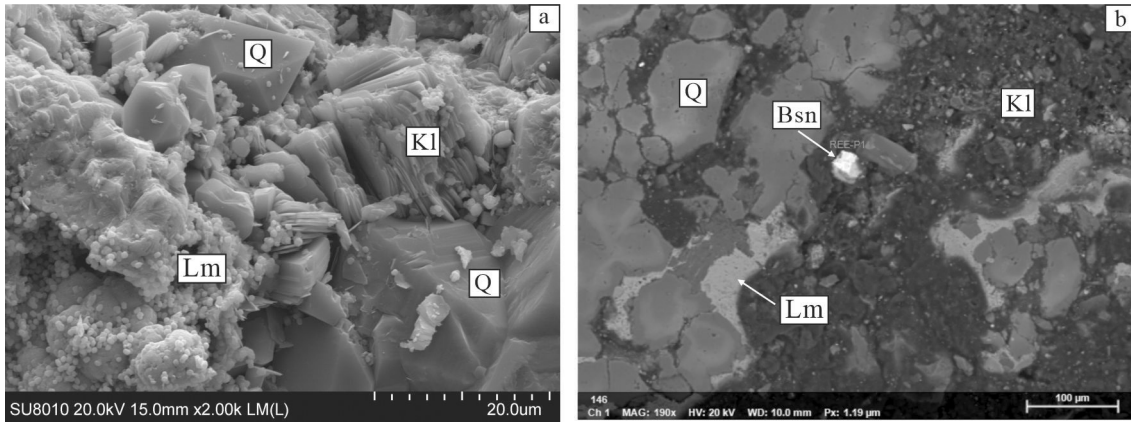


图4 稀土矿石扫描电镜照片

a—扫描电镜照片;b—独立稀土矿物显微照片;Q—石英;Kl—高岭石;Lm—褐铁矿;Bsn—氟碳铈矿

Fig.4 Scanning electron microscope photograph of rare earth ores

a—Scanning electron microscope photograph; b—Micrograph of independent rare earth minerals; Q—Quartz; Kl—Kaolinite; Lm—Limonite; Bsn—Bastnaesite

同样也高于国外即将开发利用的美国芒廷帕斯碳酸岩型、格陵兰岛碱性岩型等超大型稀土矿床。另外,该沉积型稀土资源与离子吸附型、古砂矿型稀土矿对比,在矿石品位、资源规模、集中程度、开采

方式、环境影响等方面具有较大的优势,其开发前景巨大(图7a、b)。

5 开发利用潜力

笔者开展该沉积型稀土矿原矿铵盐浸出对比实验,结果表明稀土原矿中仅有少量(<5%)稀土元素以离子吸附状态赋存于矿石中。通过多轮技术攻关,利用选择性浸出技术控制焙烧温度和焙烧时间,准确破坏稀土矿中高岭石的特定结构,脱去其层状结构中的羟基,变为高活性的偏高岭石,但偏高岭石仍保持了片状的结构特征。焙烧温度低于550℃,高岭石未转化为偏高岭石,稀土无法有效浸出,焙烧温度高于850℃,高岭石结构被完全破坏,硅和铝晶型会发生变化,对稀土元素进行重新包裹,导致稀土元素无法有效浸出,焙烧过程中不使用添加剂避免产生额外的有害废气。该技术通过协同控制焙烧和浸出条件,选择性浸出偏高岭石中的稀土元素,稀土元素浸出率高于90%,同时主要杂质铝、铁、钛和硅浸出率均<5%,有效抑制杂质大量进入富稀土料液。该技术申请了国家发明专利(徐璐等,2020)。该技术的推广应用,有望使研究区内的稀土资源实现规模化工业利用。

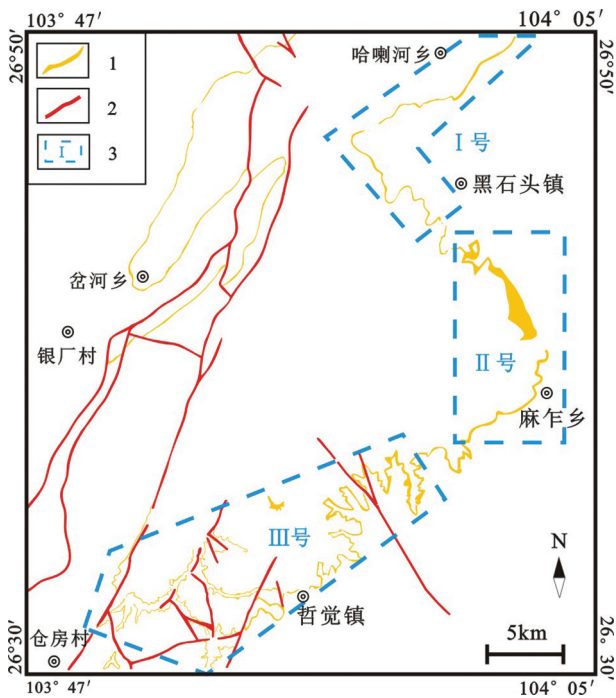


图5 稀土矿找矿靶区分布图

1—稀土矿体;2—断层;3—找矿靶区及其编号

Fig.5 Sketch map showing distribution of the target areas for rare earth ore

1—Rare earth deposit; 2—Fault; 3—Target area for prospecting and its number

6 讨论

6.1 成因探讨

滇东—黔西地区稀土矿的成因研究程度不高,

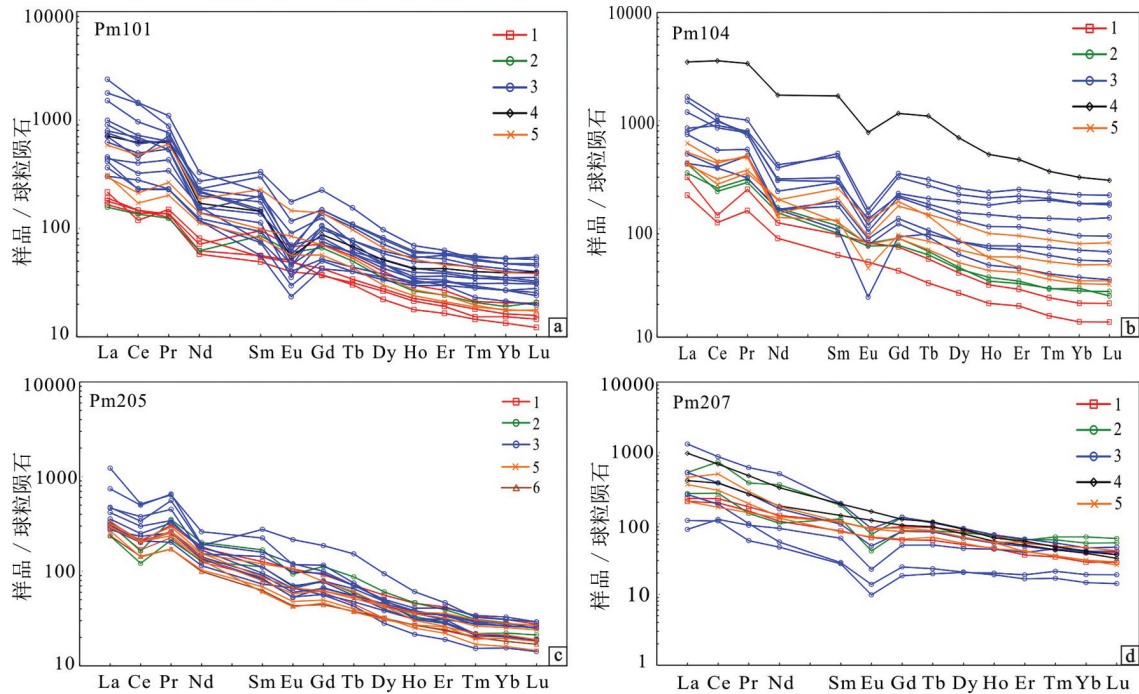


图6 全岩球粒陨石稀土配分图

(据田恩源等, 2020修改; 标准化数值据Sun and McDonough, 1989)

1—玄武岩; 2—铁质粉砂质黏土岩; 3—铝土质黏土岩; 4—炭质黏土岩; 5—黏土质粉砂岩; 6—砂质砾岩

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of the samples (modified from Tian Enyuan et al., 2020; standardized values modified from Sun and McDonough, 1989)

1-Basalt; 2-Fe-Silty clay rock; 3-Bauxitic clay rock; 4-Carbonaceous clay rock; 5-Clayey siltstone; 6-Sandy conglomerate

且存在较大争议, 目前主要有三种观点: 一是风化淋滤型, 杨瑞东等(2006)、王伟(2008)以及 Yang et al. (2008)通过分析稀土含矿层的地球化学特征, 认为该矿床属与峨眉山玄武岩有关的风化壳型, 峨眉山玄武岩及凝灰岩被强烈风化淋漓形成高岭石黏土岩, 母岩中辉石的稀土元素被解析出来, 被高岭石颗粒吸附, 使稀土富集, 形成稀土矿床; 葛枝华(2018)同样赞同风化淋滤型稀土的观点, 认为玄武岩风化过程实质就是一种脱硅富铝的过程, 辉石、长石类矿物强烈分解, 铁铝钛等氧化物明显增加, Ca、Na、Mg、K 强烈迅速淋失, SiO_2 的含量不断降低, 元素的迁移活动顺序是 $\text{CaO} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{SiO}_2$, 认为稀土元素通过风化淋滤作用在风化壳中不断富集起来。二是沉积-改造型, 张海(2014)认为稀土矿床的形成与母岩的风化作用、沉积成岩作用以及地下流体作用有关, 是沉积-再造型稀土矿床; 黄训华(1997)、周灵洁(2012)、张海(2014)、吴承泉等(2019)通过稀土物源、地球化学特征分析, 认为稀土矿物源不仅是峨眉山玄武岩, 还应包括后

期喷发的中酸性火成岩, 经风化剥蚀后形成富集稀土的玄武岩质、凝灰质及少量长英质碎屑, 经水介质搬运至沉积盆地形成高岭石硬质黏土岩, 成岩过程中遭受一定程度的热液蚀变, 促进稀土元素再富集; 三是部分学者通过对比研究二叠纪峨眉山玄武岩及其同期长英质凝灰岩的地球化学特征, 认为稀土异常富集与峨眉山玄武岩同期的碱性岩浆活动产生的凝灰岩有关, 并接受了后期低温热液改造 (Xu et al., 2001; Zhou et al., 2002; Long et al., 2004; Dai et al., 2010; Zhao et al., 2016)。

笔者研究发现, 区域上宣威组富稀土岩系整体呈层状产出, 从滇东到黔西横向演化和相变特征清晰; 富稀土岩系底部常见河道相砾岩, 辫状河沉积体系发育, 层内偶见植物碎屑化石, 层间发育水平层理等典型沉积构造; 稀土含量较高的岩石主要为灰白色铝土质黏土岩, 矿物组成主要为高岭石以及少量来自玄武岩及凝灰岩的典型矿物; 由稀土配分模式看出铁质黏土岩和黏土质粉砂岩与玄武岩相比具有继承性, 而铝土质黏土岩呈现出有别于玄武

表1 世界典型稀土矿床对比表

Table 1 Comparison table of typical rare earth deposits in the world

序号	矿床产地	国家	类型	TREO资	矿石平均品位	Σ CREO/%	Pr ₆ O ₁₁ %	Nd ₂ O ₃ %	Tb ₄ O ₇ %	Dy ₂ O ₃ %
				源/万t	TREO/%					
1	Nolans Bore	澳大利亚	碳酸岩型	122.20	2.60	26.91	5.93	20.58	0.08	0.32
2	Steenkampskraal	南非	碱性岩型	138.40	2.15	24.32	5.12	17.98	0.22	1.00
3	Mount Weld Duncan	澳大利亚	碳酸岩型	43.74	4.86	23.82	4.80	17.52	0.26	1.24
4	Green Cove Springs	美国	古砂矿型	0.50	0.005	23.66	5.00	17.50	0.26	0.90
5	Bear Lodge	美国	碱性岩型	0.05	3.05	23.32	4.91	17.87	0.13	0.41
6	Mount Weld CLD	澳大利亚	碳酸岩型	1458	9.72	23.21	5.20	17.68	0.09	0.24
7	Ashram (Eldor)	加拿大	碳酸岩型	592.2	1.40	23.17	5.07	17.48	0.13	0.49
8	Saint-Honoré Complex	加拿大	碳酸岩型	1798.6	1.70	22.31	5.07	16.94	0.07	0.23
9	Charley Creek	澳大利亚	古砂矿型	23.50	0.03	21.65	4.24	14.93	0.37	2.11
10	Ngualla	坦桑尼亚	碳酸岩型	448.5	2.30	20.84	4.70	15.92	0.07	0.16
11	Mrima Hill	肯尼亚	碳酸岩型	610.00	2.93	20.33	4.48	14.84	0.17	0.84
12	Elliot Lake	加拿大	古砂矿型	1.08	0.01	19.96	4.48	14.47	0.21	0.80
13	Kangankunde	马拉维	碳酸岩型	14.84	4.24	19.09	4.70	13.55	0.07	0.78
14	Norra Kärr	瑞典	碱性岩型	23.70	0.61	19.05	2.86	11.31	0.63	4.25
15	Strange Lake	加拿大	碱性岩型	440.00	0.90	18.81	3.05	11.17	0.57	4.02
16	Araxa	巴西	碳酸岩型	810.00	1.80	18.75	4.54	13.85	0.07	0.29
17	Milo	澳大利亚	碱性岩型	11.30	0.06	18.48	3.89	12.97	0.32	1.30
18	Tanbreez	格陵兰	碱性岩型	2795	0.65	18.21	3.23	11.69	0.50	2.79
19	Kvanefjeld	格陵兰	碱性岩型	736	1.09	16.45	4.01	11.31	0.16	0.97
20	Mountain Pass	美国	碳酸岩型	130.00	7.98	16.41	4.30	12.00	0.06	0.05
21	Dong Pao	越南	碱性岩型	700.00	5.22	14.70	4.00	10.70	0.00	0.00
22	Browns Range	澳大利亚	其他火成岩型	5.24	0.62	14.28	0.84	3.77	1.25	8.42
23	Lovozero	俄罗斯	碱性岩型	710.00	1.12	12.80	3.80	8.80	0.10	0.10
24	Niobec REE zone	加拿大	碳酸岩型	793.9	1.70	6.83	6.41	0.00	0.09	0.33

注: Σ CREO = Pr₆O₁₁ + Nd₂O₃ + Tb₄O₇ + Dy₂O₃。数据来源: 引自美国地质调查局全球稀土数据库 (<https://doi.org/10.5066/F7DR2TN4>)、Weng et al. (2015)、Schwandt et al. (2016)和Friedrichs (2017)。

岩的明显负Eu异常特征(田恩源等, 2020);滇东—黔西地区位于上扬子陆块西缘,晚震旦世以来,长期处于相对稳定的台地沉积环境,区内无岩浆活动,不具备热液型稀土及南方离子吸附型稀土的成矿条件。基于以上认识,本文认为峨眉山玄武岩及同期的凝灰岩为富稀土岩系提供了主要的物质来源,而富稀土岩系中铝土质黏土岩很可能在沉积成岩过程中混入了大量上地壳富稀土物源区的物质,使得铝土质黏土岩中稀土异常富集。综上所述,本文认为滇东—黔西地区稀土资源成因类型为沉积型,是一种新类型的稀土资源。

6.2 稀土元素赋存状态

该稀土矿中稀土元素的赋存状态存在较大争议,前人分析矿石中稀土元素含量的高低可能与矿物组分有密切关系(周灵洁, 2012; Zhou et al., 2013; Zhang et al., 2016; Zhao et al., 2016, 2017; He et al., 2018)。在风化过程中,如果含稀土元素的副矿物抗风化能力弱,稀土元素则容易从副矿物中释放出来,以离子形式迁移富集于黏土矿物中,黏土矿物

含量越高,稀土含量往往也相应比较高,稀土含量与黏土矿物含量就有较高的正相关性,据此推测认为稀土元素极有可能以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;徐莺等(2018)利用电子探针、X射线衍射等现代分析测试手段并结合矿石选冶试验,认为稀土元素以类质同象为主、离子吸附相为辅的形式赋存于高岭石质黏土岩中;黄训华(1997)、吴承泉等(2019)通过分析在强烈风化条件下母岩被解析形成的稀土元素可能存在的赋存状态,认为稀土元素可能以离子吸附态、胶体吸附态等的混合态赋存于高岭石硬质黏土岩中。以上研究并未提供确凿证据证明稀土元素赋存状态。本文作者开展多组原矿铵盐浸出对比实验,稀土元素浸出率不超过20%,间接说明了稀土原矿中以离子吸附态赋存的稀土元素占比很低;据矿石岩矿鉴定,查明以独立稀土矿物形式赋存的稀土元素占比<0.1%,以类质同像(非独立稀土矿物)形式赋存的稀土元素占比也很低;而通过550℃~850℃焙烧选择性浸出技术,

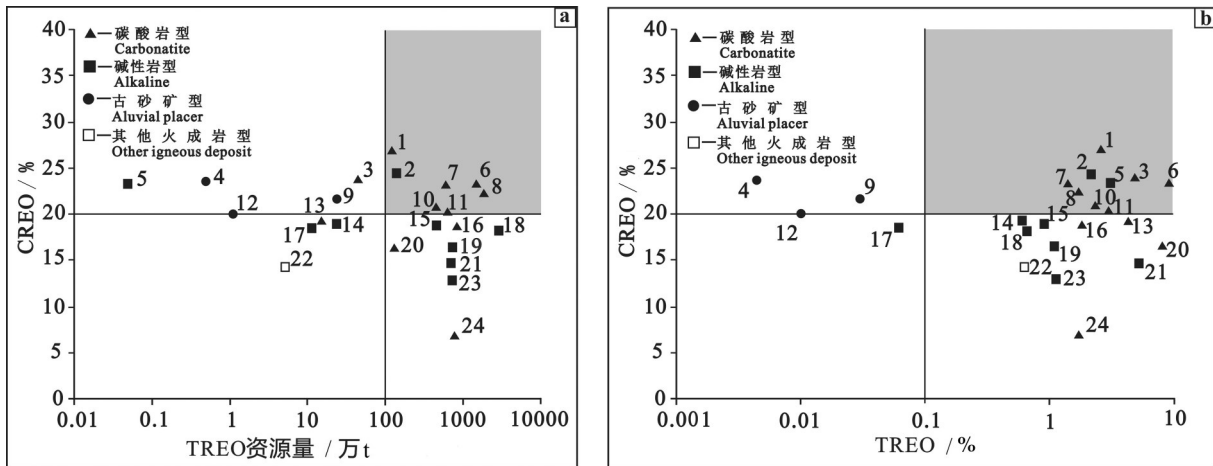


图7 世界典型稀土矿床“关键稀土元素(CREE)”含量对比图(矿床序号如表1所示)

a—关键稀土元素含量-资源量对比图;b—关键稀土元素含量-矿石品位对比图

Fig.7 CREE content comparison diagram of typical rare earth deposits in the world (the sequence number of deposits is shown in

Table 1)

a—CREE—Resource comparison diagram; b—CREE—ore content comparison diagram

准确破坏稀土元素载体矿物——高岭石的特定结构,稀土元素浸出率高于90%。基于以上研究,推测稀土元素极有可能以某种形态赋存于高岭石矿物晶体层间间隙中。

6.3 关键稀土元素及其价值

随着全球新材料、新技术、新能源、高新电子、高端装备制造、先进军事装备等战略性新兴产业迅猛发展,加快了对原材料的结构性调整,一批新兴战略性关键矿产成为各国竞相争夺的资源。根据稀土各元素特有的性质,轻稀土中的Pr、Nd,重稀土中的Tb、Dy等元素由于其在高强度永磁行业、新能源汽车产业、高端声光电材料等方面具备不可替代的地位,这些制约着全球新兴产业、高新科技健康发展的稀土元素称之为“关键稀土元素(CREE)”。据上海有色网公布的2020年6月稀土氧化物实时交易均价(据上海有色网未公布Tm₂O₃、Yb₂O₃、Lu₂O₃成交均价)显示(图8),Pr、Nd、Tb、Dy关键稀土氧化物价格分别29.5万元/t、28.0万元/t、419万元/t、194万元/t,合计约占所有单一稀土氧化物价格总和的88%,可见关键稀土元素具有极高的经济价值和重要的战略地位。

滇东—黔西地区发现的沉积型稀土矿具有矿层厚、矿石品位高、资源潜力大、矿石中关键稀土元素(CREE)占比高等特点,特别是矿石选冶新工艺取得重大突破,使该类型稀土矿可能实现规模化工

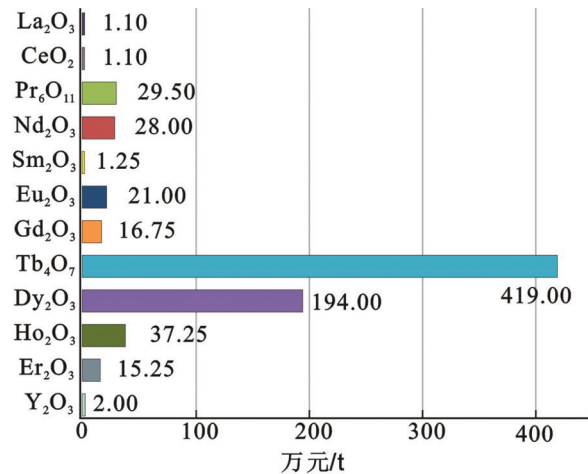


图8 稀土氧化物价格对比柱状图

Fig.8 Price comparison bar chart of rare earth oxide

业利用。该沉积型稀土矿的发现既丰富了全球稀土资源工业类型,又支撑了国家关键稀土资源战略储备。

7 结论

(1)滇东—黔西地区发育于二叠系宣威组的稀土矿,其成因类型属沉积型。

(2)稀土元素极有可能以某种形式赋存于高岭石矿物晶体层间间隙中。

(3)该沉积型稀土矿具有矿体厚度大、矿石品位高、资源潜力大、开采成本低、矿石中关键稀土元

素(CREO)占比高等优点,其开发利用前景较好。

(4)该沉积型稀土资源的发现既丰富了全球稀土资源工业类型,又支撑了国家关键稀土资源战略储备。

致谢:感谢谭洪旗博士在本文成稿过程中提供帮助;感谢孙勇、梅亚军、田康志参与了本文图件的绘制;感谢两位匿名审稿专家及编辑部老师给本文提出了宝贵的意见、建议。

References

- Dai Chuangu. 2017. Regional Geology of Guizhou Province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Dai S F, Zhou Y P, Zhang M Q, Wang X B, Wang J M, Song X L, Jiang Y F, Luo Y B, Song Z T, Yang Z, Ren D Y. 2010. 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, 83(1): 55-63.
- Friedrichs P. 2017. Development of a Rare Earth Element Resource Database Management System[D]. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 165-169.
- Ge Zhihua. 2018. Study on the mechanism of rare earth migration in the weathering crust of basaltic rocks in Weining region, Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University, 1-71(in Chinese with English abstract).
- He P N, He M Y, Zhang H. 2018. State of rare earth elements in the rare earth deposits of Northwest Guizhou, China[J]. Acta Geochimica, 37(6): 867-874.
- Huang Xunhua. 1997. The Lufang rare earth deposit in Weining, Western Guizhou and its mineralization[J]. Guizhou Geology, (4): 328-333(in Chinese with English abstract).
- Information Office of the State Council of the People's Republic of China. 2012. China's Rare Earth Situation and Policy: June 2012[M]. Beijing: People's Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Long X, Xu Y G, Mei H J, Zheng Y F, He B, Pirajno F. 2004. 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, 228: 525-546.
- Luo Yaonan. 1985. Understanding and progress in the study of Panxi Paleorift[J]. Geology in China, (1): 29-35(in Chinese with English abstract).
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation[J]. Journal of Geology, 101(2): 295-303.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 36(1): 1-28(in Chinese with English abstract).
- Schnwandt H K, Barnes G B, Ulrich T. 2016. A description of the world-class rare earth element deposit, Rimbreez, South Greenland[J]. Rare Earths Industry, 73-85.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society London Special Publications, 42 (1): 313-345.
- Tian Enyuan, Gong Daxing, Lai Yang, Qiu Xiaolong, Xie Hua, Tian Kangzhi. 2020. Genesis and enrichment of sedimentary rare earth in Weining area, Guizhou Province[J]. Earth Science. (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Deng Maochun, Zhao Ting, Liu Lijun. 2018. Exploration and research progress on ion-adsorption type REE deposit in South China[J]. China Geology, 1: 415-424.
- Wang Wei. 2008. Study on Permian Basalt Weathering Crust and Enrichment of Rare-earth element in Western Guizhou Province China[D]. Guizhou: Guizhou University (in Chinese with English abstract).
- Wen Jun, Zhu Helin, Zhang Jinyuan, Zhang Hangfei, Guo Wenyan, You Xuejun, Zhao Wei, Li Pengcheng, Chen Dongfang. 2021. The first discovery of the paleo-weathering crust-sedimentary Nb and rare earth deposits at the bottom of Xuanwei Formation in the Muchuan area of southern Sichuan[J]. Geology in China, 48(3): 970-971(in Chinese with English abstract).
- Weng Z H, Simon J, Gavin M, Nawshad H. 2015. A detailed assessment of global rare earth element resources: Opportunities and challenges[J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 110: 1925-1952.
- Wu Chengquan, Zhang Zhengwei, Qing Haiibo, Yoshio Takahashi, Zhou Lingjie, Xu Jinghong, Li Xiyao, Jin Zirui. 2019. Occurrence and enrichment of rare earth elements in clay rocks of Xuanwei formation in western Guizhou [C]//Abstracts of the 9th National Symposium on metallogenic theory and prospecting methods(in Chinese with English abstract).
- Xu Guangxiang. 1995. Rare Earth [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1-699(in Chinese with English abstract).
- Xu Lu, Li Yuankun, Hui Bo, Qing Jianhua, Dai Zongmin, Gong Daxing. 2020. A selective leaching method of sedimentary rare earth ore[P]. China, 2020-04-24(in Chinese with English abstract).
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. Lithos, 58(3-4): 145-168.
- Xu Ying, Dai Zongming, Gong Daxing, Hui Bo. 2018. Study on the occurrence state of rare earth elements of rare earth-enriched rocks in the Permian Xuanwei Group in Guizhou Province[J].

- Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 214(6): 95–99,106 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Wang Wei, Bao Miao, Wang Qiang, Wei Huairui. 2006. Geochemical character of rare earth mineral from the top of Permin basalt, Hezhang County, Guizhou province[C]//National Conference on mineral deposits(in Chinese with English abstract).
- Yang R D, Wang W, Zhang X D, Liu L, Wei H R, Bao M, Wang J X. 2008. A new type of rare earth elements deposit in weathering crust of Permian basalt in western Guizhou, NW China[J]. Journal of Rare Earths, 26(5): 753–759.
- Zhang Hai. 2014. Geological and Geochemical Characteristics and Metallogenic Mechanism of REE Deposits, Northwestern Guizhou[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–130 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zheng, Dai Chaohui. 2010. Rare earth ore and metallogenic geological characteristics in Guizhou[J]. Mineral resources and geology, (5): 433–439(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhibin, Li Chaoyang, Tu Guangchi, Xia Bing, Wei Zhenquan. 2006. Geotectonic evolution background and ore-forming process of Pb–Zn deposits in Chuan–Dian–Qian area of Southwest China[J]. Geotectonica et Mettallogenia, 30(3): 343–354(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z W, Yang X Y, Li S, Zhang Z S. 2010. Geochemical characteristics of the Xuanwei Formation in West Guizhou: Significance of sedimentary environment and mineralization[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 29(4): 355–364.
- Zhang Z W, Zheng G D, Takahashi Y, Wu C Q, Zheng C F, Yao J H, Xiao C Y. 2016. Extreme enrichment of rare earth elements in hard clay rocks and its potential as a resource[J]. Ore Geology Reviews, 72: 191–212.
- Zhao L X, Dai S F, Graham I T, Li X, Zhang B B. 2016. New insights into the lowest Xuanwei Formation in eastern Yunnan Province, SW China: Implications for Emeishan large igneous province felsic tuff deposition and the cause of the end–Guadalupian mass extinction[J]. Lithos, 264: 375–391.
- Zhao L X, Dai S F, Graham I T, Li X, Liu H D, Song X L, Hower J C, Zhou Y P. 2017. Cryptic sediment–hosted critical metal mineralization from eastern Yunnan Province, southwestern China: mineralogy, geochemistry, relationship to Emeishan alkaline magmatism and possible origin[J]. Ore Geology Reviews, 80: 116–140.
- Zhou L J, Zhang Z W, Li Y J, You F H, Wu C Q, Zheng C F. 2013. Geological and geochemical characteristics in the paleo-weathering crust sedimentary type REE deposits, western Guizhou, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 73: 184–198.
- Zhou Lingjie. 2012. Geological and Geochemical Characteristics of Sedimentary Kaolinite Clay Rare Earth Deposits in Western Guizhou[D]. Guizhou: Institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–81(in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y, Robinson P T, Sun M, Kennedy A, Leshner M, Keays R R. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end–Guadalupian mass extinction[J]. Earth and Planetary Science Letters, 196: 113–122.
- 《Mineral resources industry requirements Manual》Editorial Committee. 2014. Mineral Resources Industry Requirements Manual [M]. Beijing : Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 戴传固. 2017. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1–1153.
- 葛枝华. 2018. 威宁地区玄武岩风化壳中稀土迁移富集机制研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 1–71.
- 黄训华. 1997. 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, (4): 328–333.
- 骆耀南. 1985. 攀西古裂谷研究中的认识和进展[J]. 中国地质, (1): 29–35.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1–28.
- 田恩源, 龚大兴, 赖杨, 邱小龙, 谢华, 田康志. 2020. 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(网络首发).
- 王伟. 2008. 贵州西部二叠系玄武岩风化壳及其中稀土富集规律研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 1–67.
- 文俊, 竹合林, 张金元, 张航飞, 郭文彦, 游学军, 赵伟, 李鹏程, 陈东方. 2021. 川南沐川地区首次发现宣威组底部古风化壳-沉积型铈、稀土矿[J]. 中国地质, 48(3): 970–971.
- 吴承泉, 张正伟, 秦海波, Yoshio, Takahashi, 周灵洁, 徐进鸿, 李溪遥, 靳子茹. 2019. 贵州西部宣威组黏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论文摘要集.
- 徐光宪. 1995. 稀土[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1–699.
- 徐璐, 李元坤, 惠博, 秦建华, 戴宗明, 龚大兴. 2020. 一种选择性浸出沉积型稀土矿的方法[P]. 中国, CN 109266839 B. 2020–04–24.
- 徐莺, 戴宗明, 龚大兴, 惠博. 2018. 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, 214(6): 95–99, 106.
- 杨瑞东, 王伟, 鲍森, 王强, 魏怀瑞. 2006. 贵州赫章二叠系玄武岩顶部稀土矿床地球化学特征[C]. 全国矿床会议.
- 张海. 2014. 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, 1–130.
- 张震, 戴朝辉. 2010. 贵州稀土矿及成矿地质特征[J]. 矿产与地质, (5): 433–439.
- 张志斌, 李朝阳, 涂光帆, 夏斌, 韦振权. 2006. 川、滇、黔接壤地区铅锌矿床产出的大地构造演化背景及成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 30(3): 343–354.
- 中华人民共和国国务院办公厅. 2012. 中国的稀土状况与政策: 2012年6月[M]. 北京: 人民出版社, 2012年6月.
- 周灵洁. 2012. 贵州西部沉积型高岭石质黏土岩稀土矿床的地质和地球化学特征[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1–81.
- 《矿产资源工业要求手册》编委会. 2014. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京: 地质出版社.