

文章编号: 1000-4734(2021)04-0531-17

# 贵州西部二叠系峨眉山玄武岩顶部古风化壳 钪-铌-稀土矿化富集层的发现与意义

袁民汕<sup>1</sup>, 蔡国盛<sup>1</sup>, 曾道国<sup>1\*</sup>, 金中国<sup>2</sup>, 杜蔺<sup>1</sup>, 向明坤<sup>1</sup>,  
薛洪富<sup>1</sup>, 沈其俊<sup>3</sup>, 黄智龙<sup>4</sup>

(1. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局 地质矿产勘查院, 贵州 贵阳 550005;  
2. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵州 贵阳 550005; 3. 贵州省土地矿产资源储备局, 贵州 贵阳 550005;  
4. 中国科学院 地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 二叠系峨眉山玄武岩顶部与上覆龙潭组不整合面广泛发育区域性古风化壳, 该类古风化壳在川滇黔地区广泛分布, 具有产出层位稳定, 厚度大, 多元素富集特点。目前, 总体上对该类古风化壳的成矿和资源潜力研究程度不高, 本次在水城—纳雍地区开展系统的岩石地球化学调查发现该层位具有明显的钪、铌、稀土矿化。矿化富集层中  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  介于  $40 \times 10^{-6} \sim 133 \times 10^{-6}$ , 平均  $73 \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$  介于  $30 \times 10^{-6} \sim 392 \times 10^{-6}$ , 平均  $229 \times 10^{-6}$ ,  $w(\Sigma\text{RE}_2\text{O}_3)$  介于  $0.052\% \sim 0.214\%$ , 平均  $0.093\%$ 。钪、铌、稀土具有较明显的“分异”和“分层”富集特征, 钪主要富集于中下部含铁质粘土岩系, 形成于弱还原环境, 铌、稀土主要富集于上部铝质、碳质粘土岩系, 形成于氧化-还原转换环境, 稀土元素为 LREE 富集型, 在含碳质粘土岩、碳质页岩中富集程度最高, 暗示有机质在稀土元素的迁移、富集过程中可能起到了重要的介质作用。稀土配分、La/Yb- $\Sigma\text{REE}$  图解及 Eu 异常特征指示物源主要为峨眉山玄武岩, 可能有少量中酸性火成岩的贡献。本文研究表明川滇黔地区的这类古风化壳中的钪、铌、稀土具有较大的资源潜力, 未来有望成为古风化壳型(古风化-沉积型)钪、铌、稀土矿床的重要产出层, 具有巨大的勘查、评价及综合研究价值。

**关键词:** 钪-铌-稀土; 峨眉山玄武岩; 古风化壳; 贵州西部

**中图分类号:** P618.7; P595 **文献标识码:** A **doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.089

**第一作者:** 袁民汕, 男, 1989年生, 工程师, 硕士, 从事矿产勘查、找矿预测研究. E-mail: 649116136@qq.com

## Discovery and significance of the Sc-Nb-REE-enriched zone in the paleocrust of weathering atop the Permian Emeishan basalt in the western Guizhou, China

GUN Min-shan<sup>1</sup>, CAI Guo-sheng<sup>1</sup>, ZENG Dao-guo<sup>1\*</sup>, JIN Zhong-guo<sup>2</sup>, DU Lin<sup>1</sup>, XIANG Ming-kun<sup>1</sup>, XUE  
Hong-fu<sup>1</sup>, SHEN Qi-jun<sup>3</sup>, HUANG Zhi-long<sup>4</sup>

(1. Institute of Geological and Mineral Exploration, Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China; 2. Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Guiyang 550005, China; 3. Land Mineral Resources Reserve Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550005, China; 4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The palaeocrust of weathering, widely developed within the unconformity between the Permian Emeishan basalt and the Longtan Formation in the Sichuan-Yunnan-Guizhou area, is characterized by stable

收稿日期: 2021-03-26

基金项目: 贵州省地质勘查基金项目(编号: GZMC-ZG20192015-4)

\* 通讯作者, E-mail: 826845843@qq.com

layer, large thickness, and multi-elemental enrichments. However, very few studies have been carried out on its mineralization and resource potential. In this paper, it has been found that there are obvious Sc, Nb and REE enrichments in the palaeocrust of the Shuicheng-Nayong area based on the systematic petrogeochemical investigation. Samples of the enrichment layer have  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  contents ranging from  $40 \times 10^{-6}$  to  $133 \times 10^{-6}$ , with an average of  $73 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  contents ranging from  $30 \times 10^{-6}$  to  $392 \times 10^{-6}$ , with an average of  $229 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma\text{RE}_2\text{O}_3$  contents ranging from 0.052% to 0.214%, with an average of 0.093%. The Sc, Nb and REE enrichments show obvious characteristics of differentiation and stratification. The Sc enrichment mainly occurred in iron-bearing claystones in the middle and lower parts of the palaeocrust under a weakly reduced environment. The Nb and REE enrichments occurred mainly in aluminous and carbonaceous claystones in upper part of the palaeocrust under a transition environment from oxidation to reduction. The LREE-enriched patterns and the highest REE enrichment in carbonaceous claystone and carbonaceous shale indicate that organic matter may have played an important role in processes of the migration and enrichment of REE elements. REE distribution patterns, La/Yb- $\Sigma\text{REE}$  diagram and  $\delta\text{Eu}$  characteristics indicate that REE could be mainly sourced from Emeishan basalts with possibly minor contribution from intermediate-acidic igneous rocks. This study shows that these paleocrusts of weathering in the Sichuan-Yunnan-Guizhou area may have relatively large resource potential of Sc, Nd and REE and could become important layers of the palaeocrust-type (palaeoweathering-sedimentary type) Sc, Nb, and REE deposit in future with great values of exploration, evaluation, and research.

**Keywords:** Sc-Nb-REE; Permian Emeishan basalt; Paleocrust of weathering; Western Guizhou

位于川、滇、黔三省的峨眉山大火成岩省 (ELIP) 是中国唯一被国际地学界承认的大火成岩省, 形成于 250~260 Ma<sup>[1-2]</sup>, 喷发持续约 10 Ma, 为扬子陆块演化历史上一次重大的地质事件, 形成了大面积的峨眉山玄武岩<sup>[3-5]</sup>。关于峨眉山大火成岩省成矿系统, 成矿系列及相关矿床成矿作用, 前人开展了大量的研究和讨论<sup>[6-9]</sup>, 但主要集中于与岩浆作用有直接关系的矿床, 如与岩浆硫化物熔离作用有关的 Cu-Ni-PGE 岩浆硫化物矿床, 与岩浆结晶分异作用有关的 V-Ti 磁铁矿矿床, 与溢流玄武岩火山喷气作用有关的火山岩型 Cu、Fe 矿床以及岩浆热液型锂、铌矿床等<sup>[7,10-11]</sup>。围绕峨眉山玄武岩分布区的相关找矿勘查工作亦主要围绕上述类型矿床 (矿产)。相比之下, 峨眉山玄武岩隆升和去顶剥蚀所形成的次生成矿作用及其相关矿产勘查的研究则较为薄弱<sup>[12]</sup>。近年来, 川滇地区报道了一些与峨眉山玄武岩具成因联系的表生/次生成因矿床, 如滇东北巧家—会泽地区的“沉积型”铜矿<sup>[13-14]</sup>, 川南沐川地区宣威组底部古风化壳-沉积型铌、稀土矿<sup>[15]</sup>, 云南宣威地区峨眉山玄武岩风化壳中新发现的铌、稀土矿<sup>[16]</sup>等。贵州位于峨眉山大火成岩省东缘, 二叠系玄武岩分布广泛, 晚二叠世时期, 峨眉山玄武岩遭受到大量的风化和剥蚀, 在其顶部发育了区域性的不整合面和古风化壳, 形成了与风化-剥蚀-沉积成因有关的铁、铜、锰、稀土、铌、铝土矿等金属矿产<sup>[17-22]</sup>。自 1989 年曾励训报道了贵州西部威宁县境内峨眉山玄武岩风化壳分布有离子吸附型稀土资源后, 众多学者对本区稀土资源展开了调查与研究, 在峨眉山玄武岩分布区发现了多处铌、稀土矿化点<sup>[17,23-24]</sup>。我们基于贵州省公益性地质基金项目“贵州省新兴产业矿产资源调查评价”, 围绕贵州西部玄武岩分布区以铌、铌、稀土等战略性新兴矿产资源为主攻矿种, 开展了大面积的调查研究工作, 在纳雍—水城阳长向斜南西翼二叠系峨眉山玄武岩顶部 (龙潭组底部) 古风化壳发现厚度较大、含量较高、延伸稳定的铌-铌-稀土矿化富集层。相较于前人在本区域报道的铌、稀土矿化层, 本次发现的矿化富集层具有区域分布广泛、厚度较稳定、铌元素含量较高的特点, 初步显示了较好的资源前景, 对区域寻找同类型矿产资源, 特别是风化壳型铌、铌矿床提供了重要的找矿方向, 同时为丰富峨眉山大火成岩省表生/次生成矿作用研究提供了有益的案例和研究对象。

## 1 地质背景

研究区位于扬子地台西南缘, 处于峨眉山大火成岩省过渡带—外带 (图 1a)。峨眉山玄武岩集中分布于威宁、赫章、水城、纳雍、织金、普安等贵州西部地区, 分布面积约为 30000 km<sup>2</sup>, 黔西、息烽、

开阳、瓮安等地零星分布。玄武岩厚度在本区自西向东逐渐变薄, 以赫章—水城—普安以西区域厚度较大, 厚度多在 300~800 m, 威宁南西舍居乐处厚度最大 (1249 m)<sup>[25]</sup>。赫章—水城—普安以东区域, 厚度一般小于 300 m, 开阳、瓮安至贵阳周边, 呈零星分布, 厚度一般只有数十米直至尖灭。

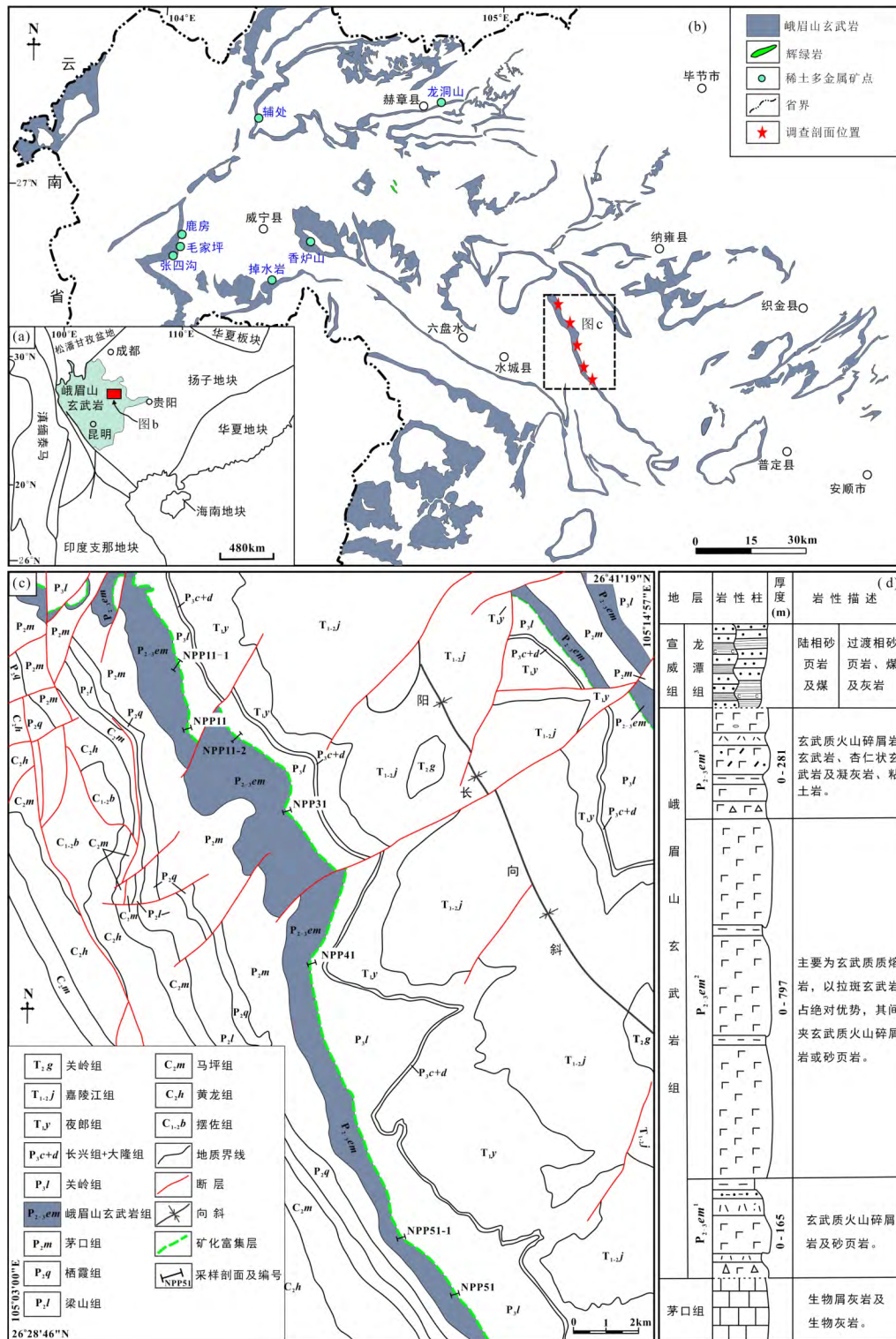


图 1 区域地质简图 (a 据文献[26], b 据文献[27]修编)、(c) 研究区地质图、(d) 区域峨眉山玄武岩柱状图(据文献[19]修编)

Fig. 1. Regional geological sketch map (a, modified after reference [26]; b, modified after reference [27]); (c) Geological map of the study area; (d) Stratigraphic column of Emeishan basalt in the west Guizhou (modified after reference [19]).

区域上峨眉山玄武岩组 ( $P_{2-3em}$ ) 与下伏二叠系中统茅口组 ( $P_{2m}$ ) 灰岩及上覆二叠系上统宣威组 ( $P_{3x}$ ) / 龙潭组 ( $P_{3l}$ ) 均为平行不整合接触 (图 1c、d), 其岩性组合为大陆溢流斑玄武岩、玄武质火山碎屑岩, 偶夹砂岩、粘土岩、灰岩、硅质岩及煤层 (线)。具 3 喷发旋回:

第 1 旋回为玄武质熔岩、火山角砾岩、玄武质集块岩组合, 顶部为玄武质沉火山角砾-凝灰岩, 以爆发溢流为主。

第 2 旋回为玄武岩夹玄武质火山角砾岩组合, 玄武岩以致密块状为主, 喷发活动以间歇式宁静溢流相为主。

第 3 旋回为玄武质熔岩、角砾岩、凝灰岩组合, 属爆发一溢出混合相, 玄武岩分布范围自东向西退缩, 分布区边部与龙潭组煤系地层局部交替产出或呈相变关系。

本次研究区位于阳长向斜南西翼, 主体构造线方向为北西向, 北东向构造形成较晚, 错切北西向断裂和地层界线 (图 1c)。地层出露较齐全, 以石炭系和二叠系分布最广, 二叠系峨眉山玄武岩组 ( $P_{2-3em}$ ) 假整合于茅口组之上, 总体呈北西—南东展布, 岩性组合中下部为灰绿色致密状玄武岩夹薄层凝灰岩、粘土岩; 中上部为暗灰色致密状玄武岩、杏仁状玄武岩, 顶部为厚层状凝灰岩、凝灰质粘土岩; 二叠系上统龙潭组 ( $P_{3l}$ ) 平行不整合于玄武岩之上, 为一套潮坪-角洲相沉积, 为区内主要煤系地层, 主要岩性为泥岩、粉-细砂岩夹碳质泥岩、煤层 (线), 局部夹灰岩、灰绿色凝灰岩。

## 2 矿化富集层特征

### 2.1 岩性组合及岩石序列

钨、铌、稀土矿化富集层空间位置位于本区二叠系中—上统峨眉山玄武岩 ( $P_{2-3em}$ ) 第三岩性段杏仁状、致密状玄武岩之上, 龙潭组 ( $P_{3l}$ ) 底部泥质粉砂岩、粉砂质泥岩之下。本次地表工程控制岩系厚度 9.62~100.38 m, 一般厚度为 15~20 m, 局部厚度较大, 走向控制延伸长度 > 20 km, 为层状产出, 厚度、延伸较稳定 (图 2、图 3)。矿化富集层岩石组合较为稳定, 根据剖面岩性、岩相对比研究, 自下而上可分为以下岩性层。

1) 粘土化凝灰岩、粘土化玄武岩: 黄绿色、灰色, 凝灰质结构、隐晶质结构, 块状构造, 岩石粘土化较强, 厚 1.08~6.11 m, 延伸较稳定, 为本区钨元素富集的重要岩性层。

2) 玄武质、凝灰质粘土岩: 浅黄绿色, 蚀变泥质结构, 块状构造, 主要由玄武岩、凝灰岩经风氧化、蚀变形成, 厚 0~6.76 m, 该岩性层厚度不稳定, 仅局部发育, 钨元素轻度富集。

3) 含铁质、凝灰质粘土岩: 浅黄绿色、绿灰色、紫红色, 凝灰质、泥质结构, 块状、层状构造, 主要由凝灰岩经风氧化、蚀变形成, 厚 3.40~81.64 m, 一般厚 5~10 m, 局部厚度较大, 延伸稳定, 为本区钨元素富集的主要岩性层。

4) 铁质粘土岩: 紫红色、褐黄色, 泥质结构, 半土状、层状构造, 裂隙较发育, 铁染及褐铁矿化较强。岩性层厚 0.79~12.88 m, 延伸较稳定, 为本区钨元素富集的主要岩性层。

5) 铝土质粘土岩: 浅灰色、灰白色, 泥质结构, 块状、层状构造, 裂隙较发育, 铁染及褐铁矿化较强 (图 3e)。岩性层厚 0.69~2.76 m, 厚度、延伸稳定, 为本区铌元素富集的主要岩性层。

6) 含植物碎片 (屑) 粘土岩: 浅灰色、灰色、杂灰色, 泥质结构, 薄层状构造, 含大量碳化植物碎片、碎屑 (图 3b、c), 碎片多为长条状、不规则状, 分布尚均匀, 大小 1~5 cm, 碎屑多为不规则斑点状、团粒状, 大小 2~6 mm。岩性层厚 0.70~1.42 m, 厚度延伸稳定, 为本区铌元素富集标志岩性层, 亦为重要的稀土元素富集岩性层。

7) 含碳质粘土岩、碳质页岩: 深灰色、灰黑色, 泥质结构, 薄层状、叶片状构造, 常夹薄层煤线, 厚 1.08~6.11 m, 区域厚度延伸均较稳定, 为本区铌、稀土主要富集岩性层。其上覆岩性为龙潭组 ( $P_{3l}$ ) 底部泥质粉砂岩、粉砂质泥岩。



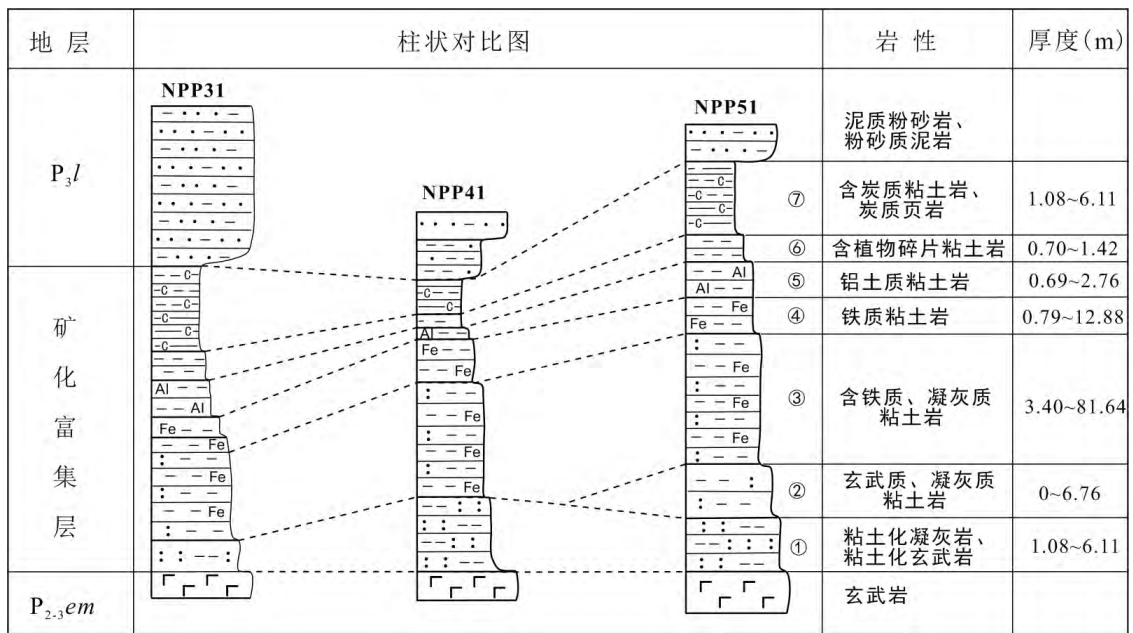
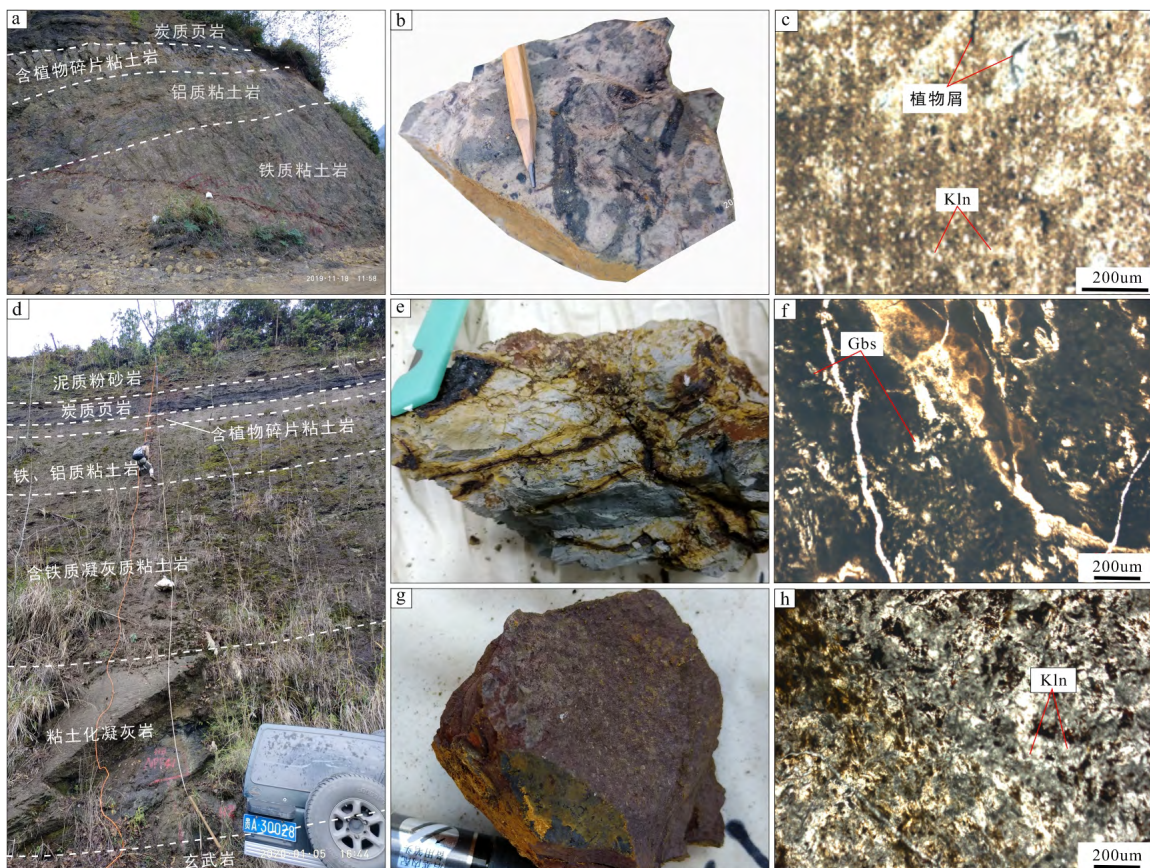


图 2 矿化富集层柱状对比图

Fig. 2. Stratigraphic columns of the ore-bearing rocks in the palaeocrust of the area.



a. NPP11 矿化富集层上部岩性剖面; b. 含植物碎片(屑)粘土岩; c. 显微纤维状泥质结构, 粘土矿物(高岭石), 以显微纤维状为主, 少量呈蠕虫状集合体, 含少量碳质条片(植物屑); d. NPP41 矿化富集层岩性剖面特征; e. 铝土质粘土岩; f. 蚀变泥质结构, 主要矿物为三水铝石和高岭石, 多层长条状, 可能为斜长石蚀变形成; g. 含铁质、凝灰质粘土岩; h. 纤维泥质结构, 粘土矿物(高岭石)呈细小纤维状分布。Kln-高岭石; Gbs-三水铝石。

图 3 典型剖面特征及岩矿石照片

Fig. 3. Photos showing characteristics of ore-bearing rocks and ores from a typical profile.

## 2.2 矿物组成

矿化富集层矿物组合相对较为简单,底部粘土化凝灰岩、粘土化玄武岩主要矿物组成为斜长石、少量绿泥石,以及粘土矿物(主要为蒙脱石);中下部含铁质粘土岩系主要由粘土矿物(蒙脱石、高岭石)、铁质(针铁矿、赤铁矿为主,裂隙中含少量次生褐铁矿)组成(图 3h),含少量绿泥石、磷灰石、锆石等蚀变矿物和残留副矿物,其中粘土矿物含量 60%~80%,铁质含量 20%~30%;中上部铝质粘土岩系主要由粘土矿物(高岭石为主)、三水铝石、硬水铝石组成(图 3c、f),含少量碳质、石英,以及金红石、锆石等副矿物,在铝质粘土岩中三水铝石、硬水铝石含量可达 50%~60%。

## 3 样品采集与测试

研究样品在野外露头良好的标准地质剖面 and 剥土工程采集。在对露头进行清理和详细地质编录基础上,连续刻槽采集新鲜岩石样品(图 3a、d),其中化学分析样品采样规格为 10 cm×5 cm,共计采集化学分析样 141 件,岩矿分析样 35 件。

样品测试在中国有色桂林地质矿产研究院矿产地质测试中心完成,钪、铌、稀土元素分析采用国家标准方法——硅酸盐岩石化学分析方法(GB/T 14506.30-2010, GB/T 14506.29-2010, YS/T 575.14-2007)。钪(Sc)、铌(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、稀土分量分析仪器为美国 Thermo iCAP Q 电感耦合等离子体质谱仪,稀土氧化物总量分析仪器为美国热电 EV300 紫外可见分光光度计。钪(Sc)、铌(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)试样用氢氟酸和硝酸在封闭溶样器中溶解,电热板上蒸发赶尽氢氟酸,再用硝酸密封溶解,稀释后用 ICP-MS 外标法直接测定;稀土氧化物总量试样用氢氧化钠熔融,熔体用少量热水浸取,并用盐酸酸化,再用氢氧化钠溶液调制 pH 为 2~2.5,在磺基水杨酸和过氧化氢存在下,用 EDTA 络合 3 价铁,加入一定量盐酸-乙酸钠缓冲溶液、三溴偶氮胂溶液,分别在波长 639 nm、652 nm 处测吸光度;稀土分量试样用过氧化钠熔融法分解样品,被测元素在碱性介质中随基本元素一起沉淀,通过过滤分离掉大量熔剂,再沉淀用酸溶解,用 ICP-MS 直接测定。分析结果采用国家一级标准物质 GBW07187(TREO 1.83%)、GBW07188(TREO 4.3%)、GBW07160(TREO 0.486%)、GBW07161(TREO 0.784%)进行监控,分析精度均优于 5%。

## 4 分析结果

本次工作系统测制剖面(含剥土)7 条,采集化学分析样品 141 件,开展 Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、稀土总量基本分析 141 件,稀土元素分析 49 件,分析结果列于表 1 和表 2。

### 4.1 Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量变化特征

矿化富集层及上覆和下伏岩性层分析结果显示(表 1),玄武岩  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  介于  $38 \times 10^{-6} \sim 53 \times 10^{-6}$ , 平均  $45 \times 10^{-6}$ ; 粘土化凝灰岩及粘土化玄武岩  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  介于  $44 \times 10^{-6} \sim 69 \times 10^{-6}$ , 平均  $59 \times 10^{-6}$ ; 玄武质、凝灰质粘土岩  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  介于  $43 \times 10^{-6} \sim 74 \times 10^{-6}$ , 平均  $57 \times 10^{-6}$ ; 含铁质、凝灰质粘土岩  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  介于  $43 \times 10^{-6} \sim 97 \times 10^{-6}$ , 平均  $68 \times 10^{-6}$ ; 铁质粘土岩  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  介于  $40 \times 10^{-6} \sim 133 \times 10^{-6}$ , 平均  $74 \times 10^{-6}$ ; 铝土质粘土岩  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  介于  $43 \times 10^{-6} \sim 77 \times 10^{-6}$ , 平均  $59 \times 10^{-6}$ ; 含植物碎片(屑)粘土岩  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  介于  $38 \times 10^{-6} \sim 73 \times 10^{-6}$ , 平均  $54 \times 10^{-6}$ ; 含碳质粘土岩、碳质页岩  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  介于  $7 \times 10^{-6} \sim 64 \times 10^{-6}$ , 平均  $28 \times 10^{-6}$ ; 泥质粉砂岩、粉砂质泥岩  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  介于  $26 \times 10^{-6} \sim 66 \times 10^{-6}$ , 平均  $42 \times 10^{-6}$ 。

总体上,钪(Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)富集程度较高,富集系数介于 1.54~4.09,矿化系数(平均质量分数/边界品位)介于 0.56~1.47,在矿化富集层中下部含铁质、凝灰质粘土岩系中富集程度较高,其中铁质粘土岩和含铁质、凝灰质粘土岩含量最高(表 1、图 4)。

表 1 矿化富集层不同岩性钨、铌、稀土含量统计表

Table 1. Statistics of the Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and ∑RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents in various kinds of ore-bearing rocks

岩性	样品数	钨					铌					稀土总量				
		w(Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/10 <sup>-6</sup>		富集 矿化			w(Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )/10 <sup>-6</sup>		富集 矿化			w(∑RE <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%		富集 矿化		
		最小值	最大值	平均值	系数	系数	最小值	最大值	平均值	系数	系数	最小值	最大值	平均值	系数	系数
泥质粉砂岩	7	26	66	42	2.35	0.85	85	162	111	4.1	1.39	0.037	0.065	0.054	2.73	1.08
含碳质粘土岩、碳质页岩	20	7.0	64	28	1.54	0.56	30	392	222	8.22	2.77	0.052	0.214	0.105	5.30	2.10
含植物碎片(屑)粘土岩	6	38	73	54	3.00	1.08	146	354	245	9.08	3.06	0.027	0.099	0.058	2.93	1.16
铝土质粘土岩	9	45	77	59	3.3	1.19	95	380	200	7.41	2.50	0.027	0.055	0.040	2.02	0.80
铁质粘土岩	27	40	133	74	4.09	1.47	62	137	88	3.27	1.10	0.018	0.089	0.041	2.07	0.82
含铁质、凝灰质粘土岩	43	43	97	68	3.76	1.35	59	143	83	3.08	1.04	0.024	0.099	0.051	2.58	1.02
玄武质、凝灰质粘土岩	10	43	74	57	3.19	1.15	51	102	74	2.76	0.93	0.03	0.112	0.057	2.88	1.14
粘土化凝灰岩、粘土化玄武岩	11	44	69	59	3.30	1.19	50	99	74	2.73	0.92	0.027	0.074	0.049	2.47	0.98
玄武岩	8	38	53	45	2.47	0.89	41	77	66	2.44	0.82	0.025	0.058	0.039	1.97	0.78

注: 富集系数=元素含量平均数/克拉克值(克拉克值引自文献[28]); 矿化系数=矿化元素平均质量分数/边界品位(其中钨(Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)现暂无执行标准和规范, 参照文献[56-58], 取值为 50×10<sup>-6</sup>; 铌(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)参照风化壳型矿床一般工业指标取值为 80×10<sup>-6</sup>; 稀土总量(∑RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)参照风化壳型矿床一般工业指标取值为 0.05%)。

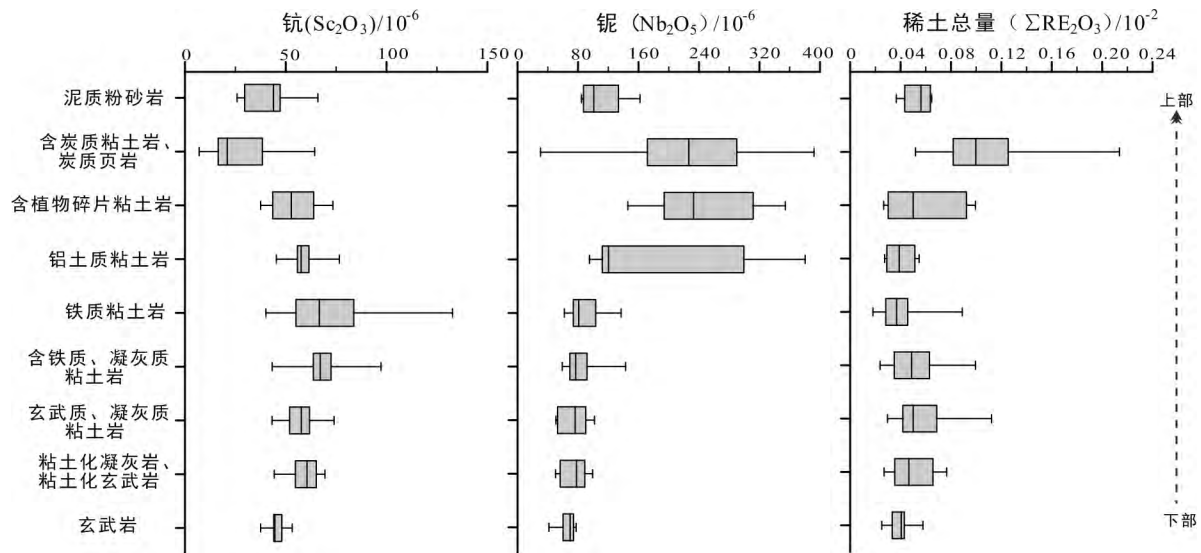


图 4 不同岩性层钨、铌、稀土含量分布对比图

Fig. 4. Comparison diagrams for Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and ∑RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents in different rocks.

#### 4.2 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量变化特征

矿化富集层及上覆和下伏岩性层分析结果显示(表 1), 玄武岩 w(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)介于 41×10<sup>-6</sup>~77×10<sup>-6</sup>, 平均 66×10<sup>-6</sup>; 粘土化凝灰岩及粘土化玄武岩 w(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)介于 50×10<sup>-6</sup>~99×10<sup>-6</sup>, 平均 74×10<sup>-6</sup>; 玄武质、凝灰质粘土岩 w(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)介于 51×10<sup>-6</sup>~102×10<sup>-6</sup>, 平均 74×10<sup>-6</sup>; 含铁质、凝灰质粘土岩 w(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)介于 59×10<sup>-6</sup>~143×10<sup>-6</sup>, 平均 83×10<sup>-6</sup>; 铁质粘土岩 w(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)介于 62×10<sup>-6</sup>~137×10<sup>-6</sup>, 平均 88×10<sup>-6</sup>; 铝土质粘土岩 w(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)介于 95×10<sup>-6</sup>~380×10<sup>-6</sup>, 平均 200×10<sup>-6</sup>; 含植物碎片(屑)粘土岩 w(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)介于 146×10<sup>-6</sup>~354×10<sup>-6</sup>, 平均 245×10<sup>-6</sup>; 含碳质粘土岩、碳质页岩 w(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)介于 30×10<sup>-6</sup>~392×10<sup>-6</sup>, 平均 222×10<sup>-6</sup>; 泥质粉砂岩、粉砂质泥岩 w(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)介于 85×10<sup>-6</sup>~162×10<sup>-6</sup>, 平均 111×10<sup>-6</sup>。

总体上, 铌(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)富集程度较高, 富集系数介于 2.44~9.08, 矿化系数介于 0.82~3.06, 在矿化富集层上部富集程度较高, 其中铝土质粘土岩、含植物碎片(屑)粘土岩以及含碳质粘土岩、碳质页岩中含量最高(表 1、图 4)。

### 4.3 稀土总量变化特征

矿化富集层及上覆和下伏岩性层分析结果显示(表 1),玄武岩稀土总量( $\Sigma RE_2O_3$ )介于 0.025%~0.058%,平均 0.039%;粘土化凝灰岩及粘土化玄武岩稀土总量( $\Sigma RE_2O_3$ )介于 0.027%~0.074%,平均 0.049%;玄武质、凝灰质粘土岩稀土总量( $\Sigma RE_2O_3$ )介于 0.030%~0.112%,平均 0.057%;含铁质、凝灰质粘土岩稀土总量( $\Sigma RE_2O_3$ )介于 0.024%~0.099%,平均 0.051%;铁质粘土岩稀土总量( $\Sigma RE_2O_3$ )介于 0.018%~0.089%,平均 0.041%;铝土质粘土岩稀土总量( $\Sigma RE_2O_3$ )介于 0.027%~0.055%,平均 0.040%;含植物碎片(屑)粘土岩稀土总量( $\Sigma RE_2O_3$ )介于 0.027%~0.099%,平均 0.058%;含碳质粘土岩、碳质页岩稀土总量( $\Sigma RE_2O_3$ )介于 0.052%~0.214%,平均 0.105%;泥质粉砂岩、粉砂质泥岩稀土总量( $\Sigma RE_2O_3$ )介于 0.037%~0.065%,平均 0.054%。

总体上,稀土元素富集程度较高,富集系数介于 1.97~5.30,矿化系数介于 0.78~2.10,在矿化富集层上部富集程度较高,其中含碳质粘土岩、碳质页岩中含量最高(表 1,图 4)。

### 4.4 稀土元素特征

选取不同岩性新鲜岩石样品 49 件进行稀土元素分析,分析结果(表 2)显示:

1) 矿化富集层下伏玄武岩  $\Sigma REE$  为  $176 \times 10^{-6} \sim 298 \times 10^{-6}$  (平均  $250 \times 10^{-6}$ ),  $LREE/HREE$  为 6.69~8.45 (平均 7.65),  $(La/Yb)_N$  为 6.87~11.36 (平均 9.07), 为轻稀土富集型, 稀土配分呈右倾型(图 5a);  $\delta Eu=0.88 \sim 0.99$  (平均 0.93), 具弱 Eu 负异常;  $\delta Ce=0.93 \sim 0.99$  (平均 0.96), 具弱 Ce 负异常(图 5a)。

2) 矿化富集层底部粘土化凝灰岩  $\Sigma REE$  为  $194 \times 10^{-6} \sim 456 \times 10^{-6}$  (平均  $325 \times 10^{-6}$ ),  $LREE/HREE$  为 4.01~7.55 (平均 5.78),  $(La/Yb)_N$  为 4.19~8.10 (平均 6.15), 为轻稀土富集型, 稀土配分呈右倾型(图 5a), 轻稀土分馏较明显;  $\delta Eu=0.90 \sim 0.93$  (平均 0.91), 具弱 Eu 负异常;  $\delta Ce=0.95 \sim 0.98$  (平均 0.97), Ce 异常不明显或具弱 Ce 负异常(图 5a)。

3) 矿化富集层下部玄武质、凝灰质粘土岩  $\Sigma REE$  为  $290 \times 10^{-6} \sim 484 \times 10^{-6}$  (平均  $395.21 \times 10^{-6}$ ),  $LREE/HREE$  为 5.47~10.41 (平均 7.82),  $(La/Yb)_N$  为 5.18~15.48 (平均 9.47), 为轻稀土富集型, 稀土配分呈右倾型(图 5b), 轻稀土分馏明显;  $\delta Eu=0.87 \sim 0.97$  (平均 0.93), 具弱 Eu 负异常;  $\delta Ce=0.83 \sim 0.95$  (平均 0.98), Ce 异常不明显或具弱 Ce 负异常(图 5b)。

4) 矿化富集层中下部含铁质、凝灰质粘土岩  $\Sigma REE$  为  $178 \times 10^{-6} \sim 689 \times 10^{-6}$  (平均  $487.30 \times 10^{-6}$ ),  $LREE/HREE$  为 7.08~14.29 (平均 10.31),  $(La/Yb)_N$  为 9.73~14.34 (平均 12.47), 为轻稀土富集型, 稀土配分呈右倾型(图 5b), 轻稀土分馏明显;  $\delta Eu=0.65 \sim 0.93$  (平均 0.83), 具弱 Eu 负异常;  $\delta Ce=0.63 \sim 1.99$  (平均 0.98), Ce 异常不明显或具弱 Ce 负异常(图 5b)。

5) 矿化富集层中下部铁质粘土岩  $\Sigma REE$  为  $228 \times 10^{-6} \sim 545 \times 10^{-6}$  (平均  $350 \times 10^{-6}$ ),  $LREE/HREE$  为 6.02~11.97 (平均 8.42),  $(La/Yb)_N$  为 8.23~13.86 (平均 10.96), 为轻稀土富集型, 稀土配分呈右倾型(图 5b), 轻稀土分馏明显;  $\delta Eu=0.78 \sim 0.96$  (平均 0.88), 具弱 Eu 负异常;  $\delta Ce=0.47 \sim 0.93$  (平均 0.83), Ce 异常不明显或具弱 Ce 负异常(图 5b)。

6) 矿化富集层上部铝质粘土岩  $\Sigma REE$  为  $228 \times 10^{-6} \sim 385 \times 10^{-6}$  (平均  $307 \times 10^{-6}$ ),  $LREE/HREE$  为 6.71~12.09 (平均 9.40),  $(La/Yb)_N$  为 5.74~11.42 (平均 8.58), 为轻稀土富集型, 稀土配分呈右倾型(图 5c), 轻稀土分馏明显;  $\delta Eu=0.49 \sim 0.97$  (平均 0.73), 具弱 Eu 负异常;  $\delta Ce=1.18 \sim 1.43$  (平均 1.31), Ce 正异常较明显(图 5c)。

7) 矿化富集层上部含植物碎片(屑)粘土岩  $\Sigma REE$  为  $458 \times 10^{-6} \sim 721 \times 10^{-6}$  (平均  $615 \times 10^{-6}$ ),  $LREE/HREE$  为 7.32~11.30 (平均 9.25),  $(La/Yb)_N$  为 7.42~9.75 (平均 8.22), 为轻稀土富集型, 稀土



配分呈右倾型 (图 5c), 轻稀土分馏明显;  $\delta Eu=0.51\sim 0.99$  (平均 0.77), 具弱 Eu 负异常;  $\delta Ce=1.06\sim 2.20$  (平均 1.50), Ce 正异常较明显 (图 5c)。

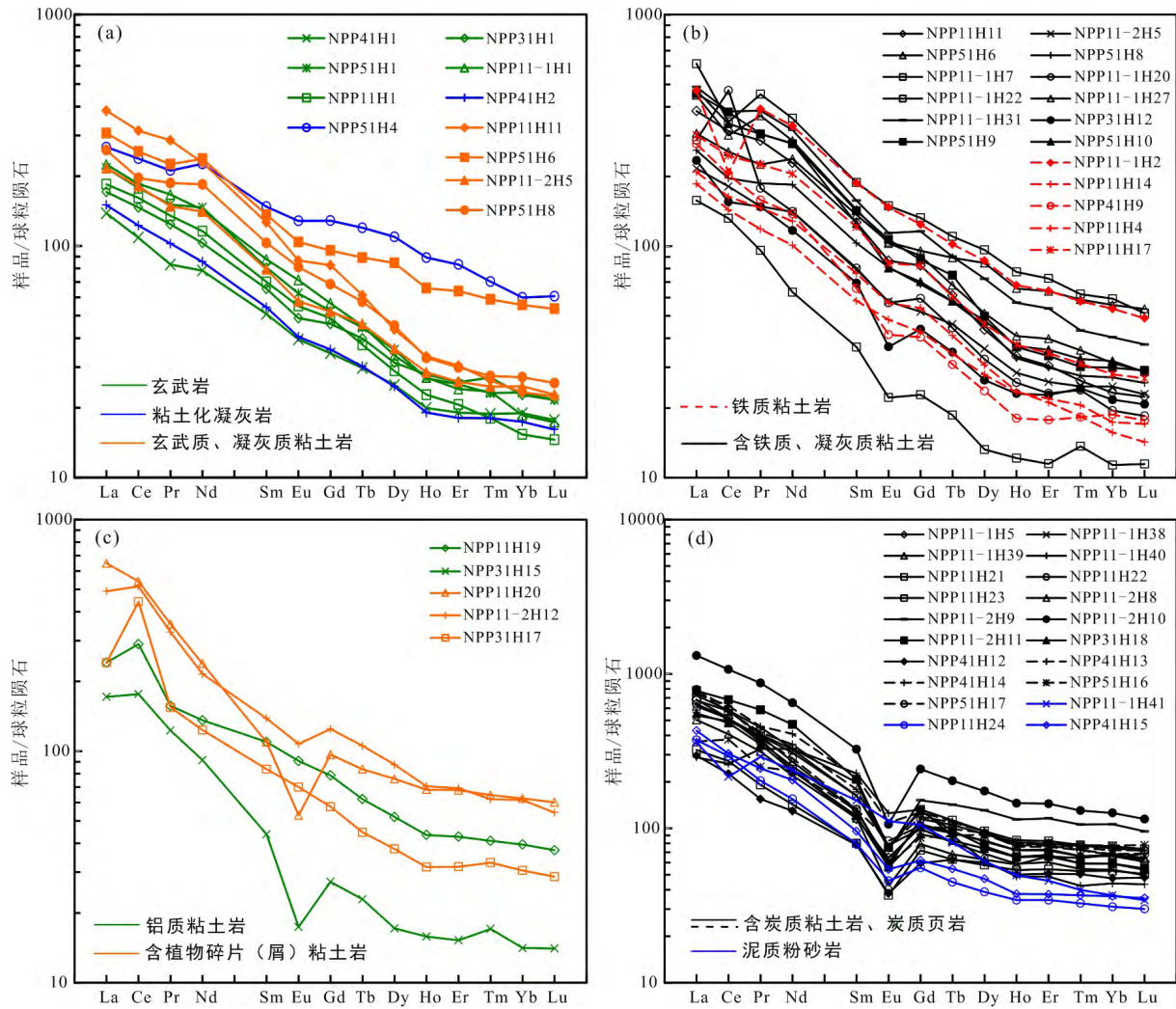


图 5 稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

Fig. 5. Chondrite-normalized REE patterns for various samples.

表 2 不同岩性样品稀土元素分析结果表 ( $w_B/10^{-6}$ )

Table 2. Analytical results of rare earth elements for samples of different kinds of rocks

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
玄武岩															
NPP41H1	32.8	66.5	7.89	36.5	7.77	2.29	7.07	1.11	6.37	1.13	3.16	0.48	3.22	0.45	32.0
NPP31H1	40.6	89.8	11.8	48.1	10.0	2.83	9.46	1.49	7.96	1.58	4.27	0.69	3.87	0.55	44.0
NPP51H1	51.4	109	14.3	68.5	12.3	3.62	10.8	1.66	9.05	1.52	4.18	0.59	3.96	0.55	43.6
NPP11-1H1	53.3	113	15.8	66.8	13.4	4.13	11.6	1.69	8.56	1.53	3.99	0.60	3.16	0.44	41.8
NPP11H1	43.8	98.6	12.8	54.1	10.7	3.19	10.0	1.40	7.33	1.29	3.42	0.46	2.61	0.37	35.0
粘土化凝灰岩															
NPP41H2	35.6	75.0	9.73	39.9	8.31	2.35	7.34	1.13	6.28	1.08	2.99	0.46	2.96	0.41	30.2
NPP51H4	63.3	146	20.1	106	22.6	7.44	26.4	4.48	27.8	5.04	13.8	1.79	10.2	1.54	156
玄武质、凝灰质粘土岩															
NPP11H11	90.9	192	27.2	107	19.3	5.02	17.0	2.29	11.1	1.89	5.04	0.67	3.96	0.57	48.6
NPP11-2H5	51.4	111	14.1	65.7	12.1	3.34	10.7	1.72	9.15	1.61	4.29	0.63	4.21	0.58	44.5
NPP51H6	72.7	156	21.4	111	20.9	6.03	19.6	3.33	21.5	3.72	10.6	1.50	9.46	1.36	111
NPP51H8	61.4	120	17.8	86.1	15.8	4.70	14.1	2.15	11.5	1.86	4.95	0.70	4.61	0.65	50.6

续表 2

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
含铁质、凝灰质粘土岩															
NPP11-1H7	37.4	80.7	9.10	29.6	5.61	1.29	4.69	0.70	3.36	0.69	1.90	0.35	1.93	0.29	19.3
NPP11-1H20	68.0	288	16.9	66.0	12.3	3.30	12.2	1.66	8.25	1.46	3.83	0.61	3.31	0.47	39.0
NPP11-1H22	146	211	43.0	167	28.8	8.66	27.3	4.12	24.5	4.38	12.0	1.58	10.1	1.31	118
NPP11-1H27	106	184	34.7	133	22.0	5.96	18.7	2.54	13.0	2.32	6.59	0.90	5.32	0.73	64.0
NPP11-1H31	115	234	36.5	148	24.1	6.61	23.8	3.37	18.4	3.23	8.91	1.10	6.87	0.96	89.5
NPP31H12	55.6	95.0	14.1	54.6	10.6	2.13	9.00	1.30	6.71	1.31	3.77	0.62	3.69	0.53	32.3
NPP51H9	108	232	29.0	129	21.7	6.20	17.9	2.80	12.6	2.08	5.56	0.77	5.08	0.74	51.2
NPP51H10	112	207	29.0	130	19.2	4.66	14.4	2.16	12.1	2.10	5.91	0.83	5.43	0.73	57.3
铁质粘土岩															
NPP11-1H2	111	127	37.1	154	28.7	8.53	25.5	3.81	22.0	3.84	10.6	1.47	9.12	1.24	97.5
NPP11H4	49.6	100	13.9	59.8	11.7	3.29	11.1	1.54	7.79	1.34	3.50	0.47	2.66	0.36	38.2
NPP11H14	44.0	87.8	11.3	47.2	8.87	2.79	8.77	1.28	7.08	1.32	3.63	0.53	2.95	0.43	38.2
NPP11H17	71.4	151	21.4	95.8	18.5	4.89	16.9	2.26	11.7	2.12	5.71	0.79	4.76	0.68	54.8
NPP41H9	65.5	124	15.0	64.5	10.0	2.41	8.31	1.15	6.02	1.02	2.94	0.47	3.19	0.45	27.7
铝质粘土岩															
NPP11H19	57.2	177	14.9	63.5	16.8	5.26	16.1	2.32	13.2	2.46	7.07	1.05	6.72	0.95	64.6
NPP31H15	40.7	108	11.7	42.8	6.69	1.01	5.60	0.86	4.36	0.90	2.53	0.44	2.40	0.36	21.1
含植物碎片(屑)粘土岩															
NPP11H20	154	331	33.6	112	16.7	3.07	19.9	3.12	19.3	3.86	11.2	1.65	10.6	1.53	104
NPP11-2H12	116	315	31.0	101	21.2	6.23	25.6	3.94	22.2	3.99	11.5	1.58	10.5	1.38	94.1
NPP31H17	57.1	270	14.7	57.7	12.8	4.06	11.8	1.67	9.60	1.79	5.25	0.84	5.19	0.73	46.5
碳质泥页岩															
NPP11-1H5	162	317	35.8	111	17.6	3.74	20.9	3.48	21.1	4.09	11.9	1.68	11.2	1.54	100
NPP11-1H38	128	303	37.8	144	24.9	4.51	20.4	3.02	17.4	3.33	9.99	1.39	9.17	1.27	89.7
NPP11-1H39	147	314	37.6	127	19.6	3.53	21.8	3.53	20.9	4.08	12.1	1.69	11.4	1.60	108
NPP11-1H40	68.4	161	31.0	153	34.7	7.27	27.2	3.36	15.6	2.76	8.05	1.08	7.48	1.10	78.5
含碳质粘土岩、碳质页岩															
NPP11H21	160	352	38.7	151	24.9	4.36	27.2	4.22	24.3	4.74	13.7	1.99	13.0	1.86	134
NPP11H22	151	319	34.4	118	20.3	3.31	23.6	3.93	23.3	4.60	13.2	1.96	12.7	1.81	123
NPP11H23	76.4	167	18.2	66.8	12.2	2.14	14.8	2.35	14.7	3.03	8.99	1.35	9.01	1.29	86.4
NPP11-2H8	119	249	29.9	103	17.8	2.47	16.3	2.54	15.9	3.30	10.9	1.64	11.4	1.64	87.1
NPP11-2H9	172	356	42.8	153	30.4	4.20	31.2	5.33	33.2	6.46	19.2	2.70	18.1	2.43	164
NPP11-2H10	312	655	83.1	304	49.8	6.17	49.8	7.61	44.3	8.24	23.9	3.33	21.4	2.92	205
NPP11-2H11	185	416	55.7	220	31.8	4.37	26.7	3.61	19.5	3.70	11.1	1.51	10.0	1.40	101
NPP31H18	132	295	33.3	110	18.4	3.25	18.8	3.12	18.8	3.68	10.9	1.51	10.0	1.37	93.3
NPP41H12	70.2	138	14.7	60.5	12.0	2.20	12.2	2.34	15.2	2.84	8.42	1.29	8.07	1.22	80.7
NPP41H13	178	380	43.5	191	32.7	6.31	26.2	4.16	24.1	4.40	12.8	1.85	11.6	1.74	126
NPP41H14	181	350	39.8	163	27.3	4.41	24.4	4.08	24.3	4.45	13.2	1.90	12.3	1.84	126
NPP51H16	86.6	230	23.8	110	20.1	3.41	17.9	3.34	23.2	4.37	13.4	1.99	13.1	1.98	124
NPP51H17	188	365	36.4	133	20.3	4.81	21.3	3.71	23.7	4.30	12.6	1.84	11.4	1.72	118
泥质粉砂岩															
NPP11-1H41	85.7	132	27.7	111	23.2	6.46	21.6	3.03	15.5	2.81	7.58	1.02	6.26	0.87	78.0
NPP11H24	88.6	180	19.3	72.5	12.1	2.65	11.4	1.68	9.84	1.94	5.68	0.83	5.28	0.76	54.5
NPP41H15	102	187	23.2	96.1	14.7	3.14	12.8	2.04	12.0	2.13	6.20	0.94	6.17	0.90	60.9
样品	$\Sigma$ REE	$\Sigma$ LREE	$\Sigma$ HREE	LREE/HREE	$\delta$ Eu	$\delta$ Ce	$(La/Sm)_N$	$(La/Yb)_N$	$(Sm/Nd)_N$	$(Gd/Yb)_N$					
玄武岩															
NPP41H1	177	154	23	6.69	0.93	0.97	2.65	6.87	0.65	1.77					
NPP31H1	233	203	30	6.80	0.88	0.98	2.55	7.07	0.64	1.97					
NPP51H1	291	259	32	8.02	0.94	0.95	2.62	8.76	0.55	2.20					
NPP11-1H1	298	267	32	8.45	0.99	0.93	2.50	11.36	0.62	2.97					
NPP11H1	250	223	27	8.29	0.93	0.99	2.58	11.29	0.61	3.10					

续表 2

样品	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	LREE/HREE	δEu	δCe	(La/Sm) <sub>N</sub>	(La/Yb) <sub>N</sub>	(Sm/Nd) <sub>N</sub>	(Gd/Yb) <sub>N</sub>
粘土化凝灰岩										
NPP41H2	194	171	23	7.55	0.90	0.95	2.69	8.10	0.64	2.00
NPP51H4	456	365	91	4.01	0.93	0.98	1.76	4.19	0.66	2.09
玄武质、凝灰质粘土岩										
NPP11H11	484	442	42	10.41	0.83	0.92	2.96	15.48	0.56	3.46
NPP11-2H5	290	257	33	7.82	0.88	0.97	2.67	8.23	0.57	2.05
NPP51H6	460	389	71	5.47	0.90	0.94	2.19	5.18	0.58	1.67
NPP51H8	347	306	40	7.56	0.95	0.87	2.45	8.99	0.56	2.46
含铁质、凝灰质粘土岩										
NPP11-1H7	178	164	14	11.77	0.75	1.02	4.19	13.06	0.58	1.96
NPP11-1H20	486	455	32	14.29	0.82	1.99	3.48	13.83	0.57	2.98
NPP11-1H22	689	603	85	7.08	0.93	0.63	3.18	9.73	0.53	2.18
NPP11-1H27	537	486	50	9.71	0.88	0.73	3.04	13.47	0.51	2.84
NPP11-1H31	631	565	67	8.48	0.84	0.86	3.02	11.33	0.50	2.80
NPP31H12	259	232	27	8.62	0.65	0.80	3.30	10.16	0.60	1.97
NPP51H9	574	526	48	11.06	0.93	0.98	3.13	14.34	0.52	2.85
NPP51H10	545	501	44	11.47	0.82	0.86	3.66	13.86	0.45	2.14
铁质粘土岩										
NPP11-1H2	545	467	78	6.02	0.95	0.47	2.44	8.23	0.57	2.26
NPP11H4	267	238	29	8.28	0.87	0.90	2.68	12.55	0.60	3.37
NPP11H14	228	202	26	7.77	0.96	0.93	3.12	10.06	0.58	2.40
NPP11H17	408	363	45	8.06	0.83	0.92	2.42	10.12	0.60	2.87
NPP41H9	305	282	24	11.97	0.78	0.92	4.10	13.86	0.48	2.10
铝质粘土岩										
NPP11H19	385	335	50	6.71	0.97	1.43	2.14	5.74	0.81	1.94
NPP31H15	228	211	17	12.09	0.49	1.18	3.83	11.42	0.48	1.88
含植物碎片(屑)粘土岩										
NPP11H20	721	650	71	9.13	0.51	1.06	5.77	9.75	0.46	1.51
NPP11-2H12	671	591	81	7.32	0.82	1.24	3.45	7.50	0.65	1.98
NPP31H17	454	417	37	11.3	0.99	2.20	2.81	7.42	0.68	1.84
碳质泥页岩										
NPP11-1H5	723	647	76	8.51	0.59	0.96	5.78	9.72	0.49	1.51
NPP11-1H38	708	642	66	9.73	0.59	1.04	3.23	9.39	0.53	1.80
NPP11-1H39	725	648	77	8.41	0.52	1.00	4.70	8.67	0.48	1.54
NPP11-1H40	521	455	67	6.83	0.7	0.84	1.24	6.17	0.70	2.93
含碳质粘土岩、碳质页岩										
NPP11H21	823	732	91	8.03	0.51	1.04	4.05	8.30	0.51	1.69
NPP11H22	731	645	85	7.58	0.46	1.03	4.67	8.04	0.53	1.51
NPP11H23	398	343	56	6.17	0.48	1.05	3.93	5.72	0.56	1.33
NPP11-2H8	585	521	64	8.2	0.44	0.98	4.22	7.04	0.53	1.15
NPP11-2H9	878	759	119	6.39	0.41	0.97	3.57	6.43	0.61	1.39
NPP11-2H10	1572	1411	161	8.74	0.38	0.96	3.95	9.85	0.50	1.88
NPP11-2H11	990	913	78	11.78	0.45	0.98	3.66	12.41	0.44	2.14
NPP31H18	660	592	68	8.68	0.53	1.05	4.51	8.89	0.52	1.52
NPP41H12	349	298	52	5.77	0.55	0.99	3.69	5.87	0.61	1.22
NPP41H13	919	832	87	9.58	0.64	1.01	3.42	10.37	0.53	1.82
NPP41H14	852	765	86	8.86	0.51	0.95	4.17	9.94	0.51	1.61
NPP51H16	553	474	79	5.98	0.54	1.20	2.71	4.45	0.56	1.10
NPP51H17	828	748	81	9.28	0.7	1.00	5.81	11.10	0.47	1.51
泥质粉砂岩										
NPP11-1H41	445	386	59	6.58	0.87	0.65	2.33	9.24	0.64	2.79
NPP11H24	412	375	37	10.01	0.68	1.00	4.60	11.31	0.51	1.75
NPP41H15	469	426	43	9.88	0.69	0.89	4.37	11.12	0.47	1.67

注: 标准化数值引自 Sun 和 McDonough (1989)<sup>[29]</sup>.

8) 矿化富集层上部含碳质粘土岩、碳质页岩具有较高的稀土含量,  $\Sigma\text{REE}$  为  $349\times 10^{-6}\sim 1572\times 10^{-6}$  (平均  $754\times 10^{-6}$ ),  $\text{LREE}/\text{HREE}$  为  $5.77\sim 11.78$  (平均 8.15),  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为  $4.45\sim 12.41$  (平均 8.37), 为轻稀土富集型, 稀土配分呈右倾型 (图 5d), 轻稀土分馏较明显;  $\delta\text{Eu}=0.38\sim 0.70$  (平均 0.53), Eu 负异常特征明显 (图 5d);  $\delta\text{Ce}=0.84\sim 1.20$  (平均 1.00), Ce 异常不明显 (图 5d)。

9) 矿化富集层上覆泥质粉砂岩  $\Sigma\text{REE}$  为  $412\times 10^{-6}\sim 469\times 10^{-6}$  (平均  $442\times 10^{-6}$ ),  $\text{LREE}/\text{HREE}$  为  $6.58\sim 10.01$  (平均 8.83),  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为  $9.24\sim 11.31$  (平均 10.56), 为轻稀土富集型, 稀土配分呈右倾型 (图 5d), 轻稀土分馏较明显;  $\delta\text{Eu}=0.68\sim 0.87$  (平均 0.75), Eu 负异常特征较明显 (图 5d);  $\delta\text{Ce}=0.65\sim 1.00$  (平均 0.85), 具弱负 Ce 异常 (图 5d)。

## 5 讨论

### 5.1 钽、铌、稀土元素“分异”富集规律与机制

本次系统的剖面 (剥土) 对比研究显示, 矿化富集层自下而上岩性组合较为稳定, 中下部为一套含铁质、凝灰质粘土岩组合, 上部为一套铝质、碳质粘土岩、页岩组合, 仅 2 条剖面中下部夹有薄层碳质页岩, 为局部沉积环境不同所致, 总体上剖面岩石序列基本一致 (图 6)。钽主要富集于中下部含铁质、凝灰质粘土岩组合中 (图 6), 其中浅紫红色铁质粘土岩富集程度最高,  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  最高为  $133\times 10^{-6}$ , 平均  $74\times 10^{-6}$  ( $n=27$ ); 铌、稀土主要富集于上部铝质、碳质粘土岩、页岩组合中 (图 4,6), 其中铌主要富集于灰白色铝质粘土岩、浅灰—灰色含植物碎片 (屑) 粘土岩、深灰色碳质粘土岩 (碳质页岩) 中,  $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$  最高为  $392\times 10^{-6}$ , 平均  $220\times 10^{-6}$  ( $n=35$ ); 稀土主要富集于深灰色碳质粘土岩、碳质页岩中,  $w(\Sigma\text{RE}_2\text{O}_3)$  最高为 0.214%, 平均 0.105% ( $n=20$ )。空间上钽与铌、稀土呈现“分异”富集的特征, 且在岩性上表现为分层富集; 铌与稀土在岩性上既有分层富集, 亦有同层富集, 稀土则集中富集于深灰色碳质粘土岩、碳质页岩中 (图 4、图 6)。

基于稀土矿化层深灰色碳质粘土岩、碳质页岩样品分析, 显示本区稀土为 LREE 富集型矿化。 $\Sigma\text{Ce}$  (La-Sm) 占比为 69%~83%, 平均值为 76%;  $\Sigma\text{Eu}$  (Eu-Dy) 占比为占 5%~9%, 平均值为 6%;  $\Sigma\text{Y}$  (Ho-Y) 占比为 12%~24%, 平均值为 17%。

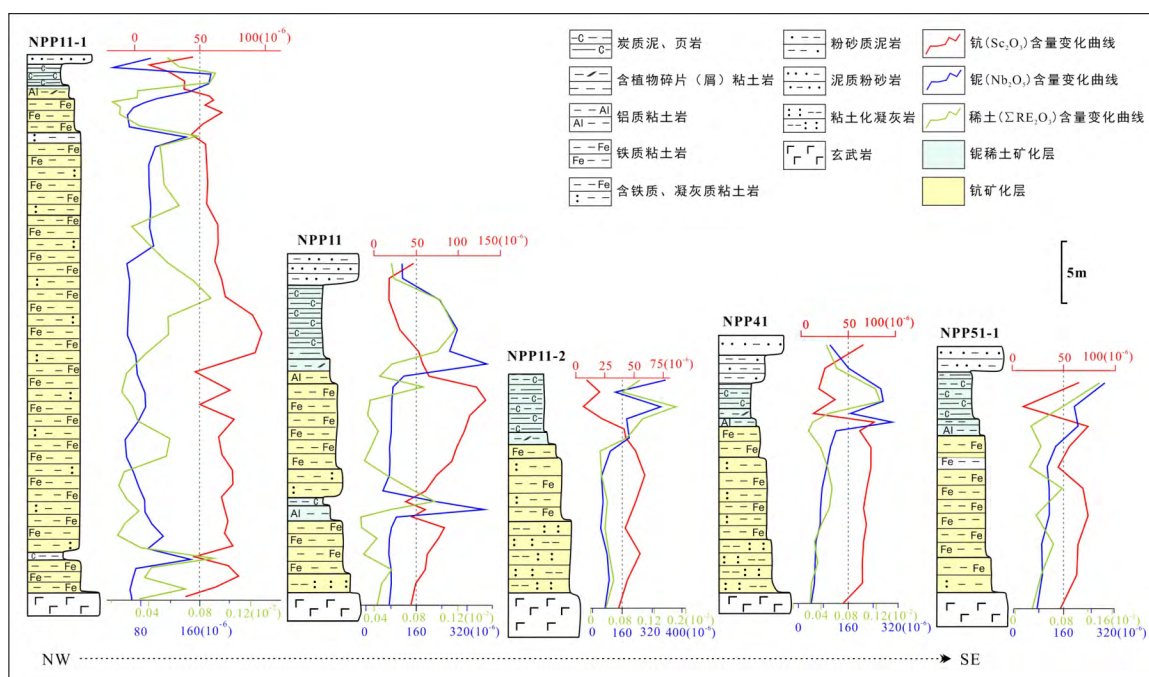


图 6 矿化富集层柱状图及元素含量曲线图

Fig. 6. The stratigraphic columns for the ore-bearing rocks and plots for their contents of various metals.



风化壳中稀土元素的富集一方面受风化母岩自身稀土含量、赋存状态的影响,此外还主要受风化程度、氧化还原条件、pH 等因素的制约,同时络阴离子亦对风化过程中元素的活性具有重要影响<sup>[30-32]</sup>,还有研究指出风化壳中各类有机物与稀土离子的络合更稳定,对稀土元素的解析、迁移的能力比无机离子更强<sup>[33]</sup>。Ce 受氧化还原条件及环境 pH 的影响,通常有+3 和+4 两种价态,在氧化环境下  $Ce^{3+}$  会被氧化成  $Ce^{4+}$ ,  $Ce^{4+}$  极易水解形成难溶(氢)氧化物,因而与其它稀土元素分离,形成风化剖面中的正 Ce 异常<sup>[34-37]</sup>。因此 Ce 异常对沉积环境和氧化还原作用具有较好的指示<sup>[35]</sup>,通常  $Ce/Ce^* > 1$  时,为正异常,指示氧化环境,  $Ce/Ce^* < 1$  时,为负异常,指示还原环境<sup>[36-37]</sup>。

本区剖面研究结果显示矿化富集层中下部(铈矿化层)粘土岩  $\delta Ce$  分布范围较小,介于 0.83~0.98, Ce 异常特征不明显,与下伏玄武岩 Ce 异常特征较为接近,指示弱还原环境。在弱还原条件下, Ce 的价态保持相对稳定, Ce 异常更多来源于对基岩(峨眉山玄武岩)弱负 Ce 异常的继承。另一方面, Ce 较其他轻稀土稳定,发生迁移富集的量远远小于 La、Nd 等轻稀土元素,因此在剖面靠近氧化还原界面之下的铁质粘土岩、含铁质、凝灰质粘土岩中显示相对较明显的负 Ce 异常(图 7)。上部铈、稀土矿化层铝质粘土岩、含植物碎片(屑)粘土岩  $\delta Ce > 1$  (介于 1.06~2.20),指示氧化环境,含碳质粘土岩、碳质页岩  $\delta Ce$  为 0.84~1.20,平均值为 1.00,指示其氧化-还原的一个过渡环境条件(图 7)。在风化剖面中,介质 pH 值自上而下逐渐增大<sup>[38-40]</sup>,而黏土质对稀土元素的吸附能力随 pH 值的上升而增高<sup>[41]</sup>。因此,风化剖面上部,在氧化、弱酸性条件下,有利于铈及稀土元素的解析、迁出,进入水溶液相迁移,有机质大量参与进一步增强了铈、稀土等元素的络合、迁移和预富集,风化壳剖面下部处于氧化还原界面之下, pH 值高于上部,不利于铈、稀土元素的解析、迁出,其稀土元素含量与源岩相比保持相对稳定;后期沉积成岩过程中,介质条件从氧化到还原转化,铈、稀土元素随着粘土和有机质从水溶液相中的沉淀富集于在古风化壳上部含碳质粘土岩、碳质页岩及含植物碎片(屑)粘土岩中,同时铈元素在上部铝质粘土岩中亦有一定程度的富集。

稀土元素和铈均可在风化过程中富集,但两者的风化行为和成矿作用,包括成矿母岩、赋存状态以及赋存层位,却有着很大的差别<sup>[42]</sup>。铈为典型的亲石元素,  $Sc^{3+}$  与  $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$  等离子具有相似的晶体化学性质,在基性-基性岩中  $Sc^{3+}$  离子主要通过类质同象替代进入辉石和角闪石等铁镁质造岩矿物中,部分也可进入磷灰石、烧绿石等副矿物中<sup>[43]</sup>。风化壳中稀土元素多以离子吸附的形式赋存,而铈则主要以类质同象的形式存在<sup>[44]</sup>。Ce 异常特征显示,本区铈矿化富集层主要形成于弱还原环境(图 7),在还原状态下,地下水易于活化 Fe 和 Mn,而使铈保持相对稳定<sup>[45]</sup>,风化壳底部较弱的地下水作用使得母岩中的单斜辉石等造岩矿物,在较为还原的条件下形成了蒙脱石质的黏土矿物,铈以类质同象替换的形式赋存在蒙脱石中<sup>[46]</sup>,使得铈在中下部古风化残积层中得到初步富集;古风化壳上部为氧化环境,形成以高岭石为主要黏土矿物的风化壳,铈从蒙脱石中解析<sup>[42]</sup>,解析释放的铈元素被铁氧化物吸附,部分经淋滤进入到中下部弱还原环境层中沉淀,使得铈元素在古风化壳中下部进一步富集。

综上,本区铈、铈、稀土元素空间上表现为明显的“分异”富集特征,铈主要富集于矿化富集层中下部含铁质、凝灰质粘土岩中,形成于弱还原环境;铈、稀土主要富集于矿化富集层(古风化壳)上部铝质粘土岩、碳质粘土岩、页岩组合岩性中,形成于氧化-还原环境转换过程,表现为“古风化-沉积富集”特点;稀土元素在碳质粘土岩、碳质页岩中富集程度最高,反映有机质在稀土元素的迁移、富集过程中可能起到了重要的介质作用。

## 5.2 物源分析

稀土元素(REE)可以较好地保留源区的地球化学信息,常用于判别沉积岩物质来源。经球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线显示,研究区矿化富集层中各组岩性与下伏峨眉山玄武岩配分模式较为一致,均表现为右倾、LREE 富集型,具有较高的 LREE/HREE 和  $(La/Yb)_N$ ,轻稀土分馏较明显(图 5),反映其主要物源为峨眉山玄武岩。此外,  $\delta Eu$  对判断母岩的物源具有较好的指示意义<sup>[47]</sup>,沉积岩通常

表现为对源岩的继承性特征，一般由中酸性火成岩风化形成的沉积岩多具有明显的负 Eu 异常，由玄武岩等基性火成岩风化形成沉积岩则无负 Eu 异常或显示较弱的负 Eu 异常。目前，尚未有研究证实风化壳剖面中氧化还原条件的变化会导致 Eu 异常的变化<sup>[48]</sup>，沉积物中的负 Eu 异常可能继承自与该流体相互作用的岩石，并不是物理化学环境的迹象<sup>[49]</sup>，因此风化壳中 Eu 异常的形成可能主要由源岩物质组分所引起。本区矿化富集层  $\delta\text{Eu}$  值具有较为明显的规律变化，中下部矿化富集层铁质粘土岩、含铁质、凝灰质粘土岩及玄武质、凝灰质粘土岩与下伏凝灰岩、玄武岩  $\delta\text{Eu}$  值具有较一致的分布范围（图 7），显示弱负 Eu 异常，且具有相似的稀土配分模式，反映其物源可能主要为峨眉山玄武岩；上部铈、稀土矿化富集层铝质粘土岩、含植物碎片（屑）粘土岩、含碳质粘土岩、碳质页岩具有较宽且较低的  $\delta\text{Eu}$  值分布范围（图 7）， $\delta\text{Eu}$  均值在 0.53~0.77 之间，与峨眉山玄武岩相比，显示明显的负 Eu 异常特征（图 5），其稀土配分模式与玄武岩较为相似，反映其物源除主要为玄武岩之外，可能还有部分中酸性火成岩的贡献。周灵洁<sup>[50]</sup>，田恩源<sup>[51]</sup>等对威宁地区同层位铈、稀土矿化层的研究亦指出物源除主要为玄武岩之外，中酸性的火成岩可能也提供了一部分的物质来源。

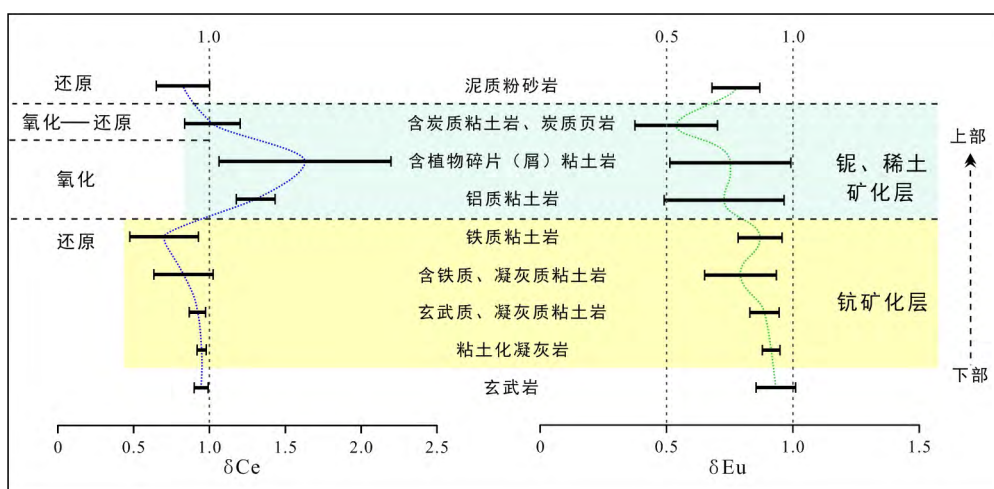
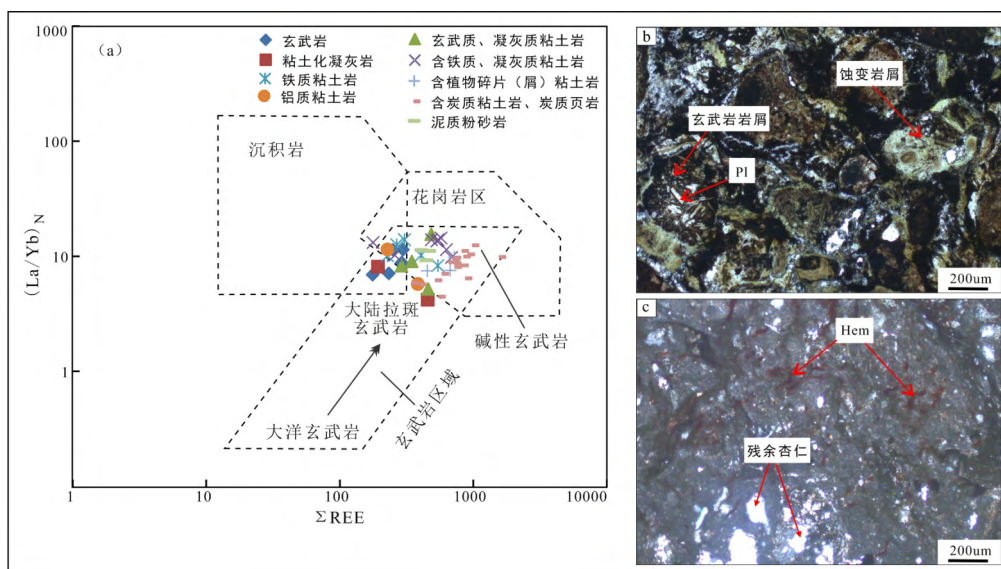


图 7 矿化富集层  $\delta\text{Ce}$  和  $\delta\text{Eu}$  分布

Fig. 7. Distribution diagrams of  $\delta\text{Ce}$  and  $\delta\text{Eu}$  values for the ore-bearing rocks in the palaeocrust.

在 La/Yb- $\Sigma$  REE 图解中，矿化富集层各类岩组均落入大陆拉板玄武岩和碱性玄武岩区，仅一件含铁质、凝灰质粘土岩落入花岗岩与沉积岩叠合区，一件碳质页岩落入花岗岩区（图 8a）。矿化富集层岩矿显微特征显示其物质组成中含大量火山岩组分，包括玄武岩岩屑、



Pl-斜长石；Hem-褐铁矿

图 8 La/Yb- $\Sigma$ REE 判别图 (a, 底图据文献[57]) 与岩矿显微照片 (b、c)

Fig. 8. The La/Yb- $\Sigma$ REE discriminant diagram (a, base map after reference [57]) and microscopic photographs for the ore-bearing rocks (b, c).

蚀变凝灰岩岩屑、残余杏仁等 (图 8b、c), 与其下伏峨眉山玄武岩组成和结构相似, 反映其物源大量来自于峨眉山玄武岩。此外, 前人研究获取的与本区矿化富集层同层位的威宁香炉山铁、稀土多金属矿含矿岩系锆石 U-Pb 年龄为 255~258 Ma<sup>[52]</sup>, 鱼坝稀土矿含矿岩系锆石 U-Pb 年龄为 252 Ma<sup>[53]</sup>, 上覆二叠系上统龙潭组和宣威组碎屑锆石峰值年龄为 260 Ma<sup>[54-55]</sup>, 误差范围内与峨眉山大火成岩省喷发时限相一致 (250~260 Ma)<sup>[1,56]</sup>, 表明研究区矿化富集层与其上覆二叠系上统龙潭组具有一致的物源, 主要来源于峨眉山大火成岩省高 Ti 玄武岩和酸性火山岩。

综上, 稀土元素地球化学特征、稀土配分、岩矿石组分、锆石 U-Pb 年代学等方面的研究均显示本区矿化富集层主要物质来源于二叠系峨眉山大成岩, 玄武岩为其主要物源, 可能亦有少量中酸性火成岩的贡献。

### 5.3 资源前景及意义

本次较为系统的剖面 (剥土) 调查研究, 控制矿化富集层走向延伸 > 20 km, 参照风化壳型铈、稀土矿床工业指标, 初步圈算铈矿化层平均厚度为 5.74 m,  $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$  平均  $229 \times 10^{-6}$ , REE 矿化层, 平均厚 6.52 m,  $w(\Sigma\text{RE}_2\text{O}_3)$  平均 0.093%。矿化层厚度较大, 延伸较稳定,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  与  $\Sigma\text{RE}_2\text{O}_3$  平均均高于风化壳型矿床工业指标 ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ :  $160 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma\text{RE}_2\text{O}_3$ : 0.08%), 具有较好的找矿前景和资源潜力。

铈资源主要以伴生矿床或伴生富集的形式产出, 目前尚无独立铈矿床工业指标, 一些风化壳淋积型稀土矿中铈的含量较高, 通常  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  在  $20 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$  为伴生铈矿床,  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  大于  $50 \times 10^{-6}$  为独立铈矿床<sup>[58]</sup>。同时参照目前国内报道的晴隆沙子铈矿床和云南二台坡铈矿床评价指标, 本次采用  $w(\text{Sc}_2\text{O}_3)$  大于  $50 \times 10^{-6}$  对本区铈矿化富集层进行评价, 初步圈算铈矿化层平均厚度为 20.47 m,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  平均  $73.27 \times 10^{-6}$ 。对比邻区晴隆沙子和二台坡铈矿床, 本区铈矿化层产出地质背景、岩矿石组构、矿物组成、物质来源、成因类型及矿石品位等与晴隆沙子铈矿床较为相似 (表 3), 显示了较好的找矿前景和资源规模。晴隆沙子铈矿床原矿石 (入选品位:  $\text{Sc}_2\text{O}_3$   $58 \times 10^{-6}$ ) 采用“焙烧—酸浸—碱浸”工艺, 用萃取可获氧化铈 99.99% 产品, 铈的浸出率为 90%<sup>[59]</sup>, 显示该类型铈矿床亦具备了一定的潜在开发利用前景。

表 3 铈矿床特征对比一览表

Table 3. Comparison of characteristics of different scandium deposits

矿床	晴隆沙子铈矿床 <sup>[59]</sup>	二台坡铈矿床 <sup>[60]</sup>	研究区
构造位置	扬子板块西南缘, 碧痕营穹状背斜	牟定-元谋的基性超基性岩带	扬子板块西南缘, 阳长向斜
赋矿地质体	第四系	基性-超基性岩脉	古风化壳
赋矿岩性	粘土、亚粘土	磁铁辉石岩、含橄辉石岩	铁质粘土岩, 含铁质、凝灰岩粘土岩
矿石类型	残坡积粘土型: 红色、黄色粘土及亚粘土	块状基性-超基性脉岩型	层状古风化壳型
矿石组构	土状构造, 泥质结构	块状构造, 粒状结构	层状构造, 泥质结构
矿石品位	$\text{Sc}_2\text{O}_3$ : $74.93 \times 10^{-6}$	$\text{Sc}_2\text{O}_3$ : $66.08 \times 10^{-6}$	$\text{Sc}_2\text{O}_3$ : $73.27 \times 10^{-6}$
矿物组成	锐钛矿、褐铁矿、绢云母、绿泥石、高岭石、石英、斜长石、褐铁矿、铁泥质等	透辉石、角闪石、锆石等	高岭石、褐铁矿、绿泥石、斜长石、三水铝石等
物质来源	峨眉山玄武岩	基性-超基性岩	峨眉山玄武岩
成因类型	富铈的峨眉山玄武岩通过漫长的风化作用, 在风化壳中形成的残坡积粘土铈矿床	基性-超基性岩型	峨眉山玄武岩顶部古风化壳残-淋积型?
规模	大型	超大型	潜在资源规模可达大型、超大型。

我国铈资源储量及勘查开发程度较低, 对外依存度高达 95%, 世界铈资源主要来源于风化壳型铈矿床, 而国内目前已发现探明的铈矿床主要为岩浆热液型<sup>[61-62]</sup>。长期以来铈矿床的研究亦主要集中于内生成矿作用相关的铈矿床类型, 对于与外生成矿作用相关的铈矿床研究相对薄弱。近年来, 在澳大利亚新发现 Nyngan、Syerston 和 SCONI 三个超大型的风化淋滤型铈矿床显示了巨大的资源及开发利用前景 (USGS, 2019), 越来越多风化壳型铈矿床被发现, 提供了潜在可用的铈资源。随着新一轮产业

革命和新型战略性产业的兴起,未来对钨、铌、稀土等战略性矿产资源需求将越来越大。本次研究区发现的钨、铌、稀土矿化层从产出空间位置、物质来源、矿物组成等均与二叠系峨眉山玄武岩顶部古风化壳密切相关,该类风化壳产出于区域二叠系上统不整合面,在贵州西部及川、滇地区广布,具有区域产出稳定、厚度较大、矿化元素多的特点,初步显现了较好的资源前景,有望成为古风化壳型(古风化-沉积型)钨、铌、稀土矿床的重要产出层,具有巨大的勘查、评价及综合研究价值。

## 6 结 论

1) 本区钨、铌、稀土元素主要富集于龙潭组(粉)砂质泥岩与峨眉山玄武岩不整合面上下一个较为稳定的“岩性段”(古风化壳),空间上表现为明显的“分异”富集特征,钨主要富集于“岩性段”(古风化壳)中下部含铁质、凝灰质粘土岩系,形成于弱还原环境;铌、稀土主要富集于“岩性段”(古风化壳)上部铝质、碳质粘土岩系,形成于氧化-原环境转换过程,表现为“古风化沉积富集”特点;稀土元素在碳质粘土岩、碳质页岩中富集程度最高,反映有机质在稀土元素的迁移、富集过程中可能起到了重要的介质作用。

2) 稀土元素地球化学特征、岩矿石组分、锆石 U-Pb 年代学等方面的研究均显示本区矿化富集层主要物质来源于二叠系峨眉山大成岩,玄武岩为其主要物源,可能亦有少量中酸性火成岩的贡献。

3) 本次研究区发现的钨、铌、稀土矿化层从产出空间位置、物质来源、矿物组成等均与二叠系峨眉山玄武岩顶部古风化壳密切相关,该类风化壳产出于区域二叠系上统不整合面,在贵州西部及川、滇地区广布,具有区域产出稳定、厚度较大、矿化元素多的特点,初步显现了较好的资源前景,有望成为古风化壳型(古风化-沉积型)钨、铌、稀土矿床的重要产出层,具有巨大的潜在资源和勘查、评价及综合研究价值。

## 参 考 文 献:

- [1] Lo C H, Chung S L, LEE T Y. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian - Triassic boundary events [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198(3): 449-458.
- [2] Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. When did the Emeishan Mantle Plume activity start? Geochronological and geochemical evidence from ultramafic -mafic dikes in southwestern China [J]. *International Geology Review*, 2004, 46(3):6-234.
- [3] He B, Xu Y G, Wang Y M, Luo Z Y. Sedimentation and lithofacies Paleogeography in southwestern China before and after the Emeishan flood volcanism: new insights into surface response to mantle plume activity[J]. *Journal of Geology*, 2006, 114(1): 117-132.
- [4] 朱江, 张招崇, 候通, 康健丽. 贵州盘县峨眉山玄武岩系顶部凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄对峨眉山大火成岩省与生物大规模灭绝关系的约束[J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2743-2751.
- [5] 徐义刚, 何斌, 罗震宇, 刘海泉. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望[J]. *矿物岩石地球化学通报*. 2013, 32(1): 25-39.
- [6] 胡瑞忠, 陶琰, 钟宏, 黄智龙, 等. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例[J]. *地学前缘*, 2005(1): 42-54.
- [7] 高振敏, 张乾, 陶琰, 等. 峨眉山地幔柱成矿作用分析[J]. *矿物学报*, 2004(2): 99-104.
- [8] 王登红. 地幔柱的概念、分类、演化与大规模成矿—对中国西南部的探讨[J]. *地学前缘*, 2001(3): 67-72.
- [9] 王焰, 王坤, 邢长明, 等. 二叠纪峨眉山地幔柱岩浆成矿作用的多样性[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(3): 404-417.
- [10] Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, et al. Geochemistry, petrogenesis, and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe- Ti- V- oxide deposits, Sichuan Province, SW China [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46(11) : 2253-2280
- [11] 秦震. 攀西地区碱性岩类稀有、稀土矿成矿条件及找矿前景[J]. *四川地质学报*, 1995(2): 102-112.
- [12] 孟昌忠, 陈旸, 张莹华, 等. 峨眉山大火成岩省去顶作用与黔西铁-多金属矿床成因: 锆石 U-Pb 同位素年代学约束[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(10): 1469-1480.
- [13] 王居里, 郭健, 刘忠奎, 等. 滇东北峨眉山玄武岩区的沉积型铜矿床[J]. *矿床地质*, 2006(6): 663-671.
- [14] 王富东, 朱笑青, 王中刚. 与峨眉山玄武岩有关的沉积型铜矿—“马豆子式”铜矿的成因研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(12): 1851-1861.
- [15] 文俊, 竹合林, 张金元, 等. 川南沐川地区首次发现宣威组底部古风化壳-沉积型铌、稀土矿[J/OL]. *中国地质*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200601.0947.002.html>, 2021-04-20
- [16] 刘殿蕊. 云南宣威地区峨眉山玄武岩风化壳中发现铌、稀土矿[J]. *中国地质*, 2020, 47(2): 540-541.
- [17] 杨瑞东, 鲍淼, 廖琳, 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, 27(1): 41-48.
- [18] 刘巽锋, 陶平. 贵州火山凝灰岩型金矿地质特征及找矿意义[J]. *中国地质*, 2001(1): 30-35.



- [19] 王伟, 杨瑞东, 鲍淼, 等. 贵州峨眉山玄武岩区风化壳与成矿关系[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2006(4): 366-370.
- [20] 王伟, 杨瑞东, 栾进华, 等. 贵州西部玄武岩风化壳中稀土矿成矿机理及成矿模式[J]. 四川地质学报, 2011, 31(4): 420-423.
- [21] 汪龙波, 高军波, 杨瑞东, 等. 黔西北上二叠统宣威组底部富铌多金属层地球化学特征研究[J]. 地质论评, 2020, 66(6): 1696-1709.
- [22] 刘胜召. 贵州西北部铌钽矿的赋存特征及潜力分析研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [23] 陈智, 侯林洋, 莫兆. 贵州威宁玉龙铌矿化体的发现及其意义[J]. 贵州地质, 2015, 32(3): 177-180.
- [24] 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.
- [25] 陈文一, 刘家仁, 王中刚, 等. 贵州峨眉山玄武岩喷发期的岩相古地理研究[J]. 古地理学报, 2003(1): 17-28.
- [26] Jian P, Liu D Y, Kroner A, et al. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China ( I ) : Geochemistry of ophiolites, arc /back-arc assemblages and withinplate igneous rocks [J]. Lithos, 2009, 113( 4 ) : 748-746.
- [27] Zhou L J, Zhang Z G, Li Y J, et al. Geological and geochemical characteristics in the paleo-weathering crust sedimentary type REE deposits, western Guizhou, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 73: 184-198.
- [28] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976, (3): 167-174.
- [29] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]. In: Saunders A D, Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [30] Wu C Y, Lu H L, Xu L M, et al. A preliminary study on modes of occurrence of rare earth elements in the tropical weathering crust of Nanling region [J]. Mineral Deposits, 1993, 12(4): 297-307.
- [31] 马英军, 霍润科, 徐志方, 等. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素[J]. 地球科学进展, 2004(1): 87-94.
- [32] 赵芝, 王登红, 陈郑辉, 等. 南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展[J]. 地质学报, 2017, 91(12): 2814-2827.
- [33] Wood S A. The aqueous geochemistry of the rare-earth elements: Critical stability constants for complexes with simple carboxylic acids at 25°C and 1 bar and their application to nuclearwaste management [ J]. Engineering Geology, 1993, 34(3-4): 229 -259.
- [34] Braun J J, Pagel M, Muller J P, et al. Cerium anomalies in lateritic profiles [ J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(3): 781 -795.
- [35] 赵晨君, 康志宏, 侯阳红, 等. 下扬子二叠系泥页岩稀土元素地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学, 2020, 45(11): 4118-4127.
- [36] 李玉娇, 张伟伟, 周灵洁, 等. 贵州省苦李井铝土矿地球化学特征及成因探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(5): 558-566.
- [37] 韩忠华, 吴波, 翁申富, 等. 黔北务正道地区含铝岩系地球化学特征及地质意义[J]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 678-687.
- [38] 宋云华, 沈丽璞, 王贤觉. 某些岩石风化壳中稀土元素的初步探讨[J]. 科学通报, 1987(9): 695-698.
- [39] 宋云华, 沈丽璞. 酸性火山岩类风化壳中稀土元素的地球化学实验研究[J]. 地球化学, 1986(3): 225-234.
- [40] Ma Y J, Liu C Q. Trace element geochemistry during chemical weathering [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(24): 2260-2263.
- [41] Yang Y Q, Hu C S, Luo Z M. Geological characteristic of mineralization of rare earth deposit of the ion-absorption type and their prospecting direction [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1981, 2(1): 102-118.
- [42] 周美夫, 李欣禧, 王振朝, 等. 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, 2020, 65(33): 3809-3824.
- [43] Eby G N. Scandium geochemistry of the Oka carbonatite complex, Oka, Quebec[J]. American Mineralogist, 1973, 58: 819-825.
- [44] 王彦斌, 王登红, 韩娟, 等. 湖南益将稀土-钽矿的石英闪长岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征: 湘南加里东期岩浆活动的年代学证据[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1062-1070.
- [45] Lapin A V, Tolstov A V, Kulikova I M. Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit [J]. Geochem Int, 2016, 54(12): 1061-1078
- [46] Chassé M, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Australian laterites reveal mechanisms governing scandium dynamics in the critical zone [J]. Geochim Cosmochim Acta, 2019, 260: 292-310.
- [47] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [48] 马英军, 霍润科, 徐志方, 等. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素[J]. 地球科学进展, 2004(1): 87-94.
- [49] Bau M, Miller P. Rare Earth Element Fractionation in Metamorphogenic Hydrothermal Calcite, Magnesite and Siderite [J]. Mineralogy and Petrology, 1992, 45: 231-246.
- [50] 周灵洁. 贵州西部沉积型高岭石质粘土岩稀土矿床的地质和地球化学特征[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [51] 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/OL]. 地球科学, 2020: 1-33[2021-03-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20201105.1401.016.html>.
- [52] 王常微, 张克信, 何卫红, 等. 贵州威宁鱼坝稀土含矿岩系的锆石 U-Pb 年龄[J]. 贵州地质, 2020, 37(1): 14-23.
- [53] 邓旭升. 右江盆地北缘上二叠统沉积相和沉积物源分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- [54] 于鑫, 杨江海, 刘建中, 等. 黔西南晚二叠世龙潭组物源分析及区域沉积古地理重建[J]. 地质学报, 2017, 91(6): 1374-1385.
- [55] He B, Xu Y, Huang X, et al. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 255(3): 306-323.
- [56] Zhong H, Campbell IH, Zhu W, et al. Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, 75(5): 1374-1395.
- [57] Allegre C J, Minster J F. Quantitative modes of trace element behavior in magmatic processes [J]. Earth Planet Sci Lett, 1978, 38(1): 449 -458.
- [58] 张玉学. 分散元素钽的矿床类型与研究前景 [J]. 地质地球化学, 1997(4): 93-97.
- [59] 聂爱国, 张敏, 孙军. 稀散元素钽形成大型独立钽矿床在贵州的首次发现[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2018, 35(4): 8-13.
- [60] 郭远生, 曾普胜, 郭欣, 等. 钽的有关问题暨滇中地区基性-超基性岩含钽性研究[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 745-754.
- [61] 王瑞江, 王登红, 李健康, 等. 稀有稀土稀散矿床资源及其开发利用[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- [62] 何海洋, 何敏, 李建武. 我国铌矿资源供需形势分析[J]. 中国矿业, 2018, 27(11): 1-5.