

文章编号: 1000-4734(2023)06-0799-11

黔西北玉龙地区 REE 矿化主控因素与找矿方向

薛洪富¹, 黄威虎^{1*}, 曾道国¹, 金中国², 黄智龙³,
吴林³, 向震中³, 叶霖³

(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. 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: 黔西北玉龙地区稀土含矿层 (Pxt) 产于宣威组 (P_{3x}) 底部, 假整合于峨眉山玄武岩组 (P_{2-3em}) 之上, 由铝质段和铁质段组成, 厚度受基底不整合面低洼起伏形态制约, 介于 3.25~18.76 m 之间。稀土矿层可划分为 7 层, 以 II 和 IV 矿层为主矿层, 具分布连续、厚度大、品位高等特点。铝质段存在是高品质稀土产出的直接影响因素, 稀土矿化富集对岩性具选择性, 铝质黏土岩、含碳质铝质泥岩、致密状铝质泥岩、含碎屑/豆鲕铝质泥岩是稀土富集优势岩相。w(Nb₂O₅) 130×10⁻⁶~550×10⁻⁶、w(ZrO₂) 0.06%~0.38%、w(TFe) 7.94%~24.72%及 A/S 比值 0.82~3.60 区间, 为 REO 品位≥0.18%集中分布区。虎家营向斜东翼中部以南、西翼中部以北地段铝质段分布连续、厚度大, 为下一步稀土找矿重点地段, 尤其是向斜东翼南部铝质段厚度大、优势岩相组合齐全, 应为下步勘查首选区。

关键词: REE 矿化; 控矿因素; 找矿方向; 黔西北

中图分类号: P588.22; P594

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2023.43.076

第一作者: 薛洪富, 男, 1988 年生, 高级工程师, 硕士研究生, 构造地质学专业, 从事构造控矿研究工作。
E-mail: gzysxhf@163.com

Main controlling factors of the REE mineralization and prospecting direction of the REE resources in the Yulong area of the northwestern Guizhou

XUE Hong-fu¹, HUANG Wei-hu^{1*}, ZENG Dao-guo¹, JIN Zhong-guo², HUANG Zhi-long³,
WU Lin³, XIANG Zhen-zhong³, YE Lin³

(1. Institute of Geology 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. Stake Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: The rare earth elements (REE) ore-bearing layer (Pxt) in the Yulong area of in the Northwest Guizhou is distributed at the bottom of Xuanwei Formation (P_{3x}), and overlaid disconformably above the Emeishan basalt Formation (P_{2-3em}). It is composed of aluminous and ferruginous claystones, with its thicknesses ranging from 3.25m to 18.76 m under restriction of the low-lying undulation on the unconformity surface of the basement. The REE ore-bearing layer can be subdivided to 7 seams, with the II and IV seams as the main ore seams, which are characterized with continuous distribution, large thickness and high grade. The existence of aluminous segment is a direct factor affecting the production of the high-grade REE ore, The REE mineralization and enrichment are selective to lithology. Aluminous claystone, carbonaceous aluminous mudstone, compact aluminous mudstone and clastic/oolitic aluminous mudstone are of dominant lithofacies for the REE enrichment. These REE-enriched samples have Nb₂O₅ contents of 130×10⁻⁶~550×10⁻⁶, ZrO₂

收稿日期: 2023-06-08

基金项目: 贵州省地勘基金项目“贵州省威宁县玉龙地区铈、稀土矿精查”(编号: 2021-01 号); 贵州省找矿突破战略行动重大协调创新项目“贵州稀土、钡、氟等特色资源成矿规律与找矿预测研究”(编号: [2022]ZD004)。

* 通讯作者, E-mail: 409659806@qq.com

contents of 0.06%-0.38%, and TFe contents of 7.94%-24.72%, with A/S ratios of 0.82-3.60. The aluminous segment is the concentrated distribution area with REO grades of $\geq 0.18\%$ for its various samples. The aluminous segments in the south side of the central part of the east limb and the north side of the central part of the west limb of the Huijiaying syncline are continuously distributed with large thickness. They are key targeting segments for the further REE ore-prospecting in the area. Especially, the southern part of the east limb of the Huijiaying syncline should be firstly choosed for the further REE exploration target as there is very thick aluminous segment containing complete combination of advantageous rock facies.

Keywords: the REE mineralization ; Ore-controlling factors; ore-prospecting direction; the northwestern Guizhou

稀土 (REE) 是我国战略性矿产资源, 广泛运用于冶金、石油、玻璃、电子、化工及新型材料等, 对国家的发展、稳定和提升国际竞争力具有重要战略意义^[1-2]。黔西北地区分布于峨眉山玄武组 (P_{2-3em}) 顶部、宣威组 (P_{3x}) /龙潭组 (P_{3l}) 底部的一套铁质、铝质黏土岩, 富集 REE、Nb、Zr、Sc 等多种关键金属^[2-15], 本文称之为稀土含矿层 (Pxt), 其中 REE 矿体呈层状、似层状、透镜体状产出, 具有分布广、层位稳定、品位高、矿层多、厚度大等特征^[4-8, 11-14, 16]。目前对这种类型 REE 矿化的成因类型存在较大争议, 如离子吸附型^[17]、风化壳型^[18]、玄武岩风化壳^[4, 19]、沉积-再造型^[6]、峨眉山玄武岩风化-沉积型^[20]等。中国地质调查局成都矿产综合利用研究所等的近期观点认为, 这是一种新类型 REE 资源, 称之为古陆相沉积型^[8, 20], 确定其普查阶段一般工业指标^[21]: REO 边界品位 0.18%、最低工业品位 0.36%、最小可采厚度 1 m、夹石最小剔除厚度 2 m。本文基于黔西北玉龙地区 60 个探矿工程详细编录和系统取样测试, 分析了该区 REE 矿化的主要控制因素和找矿方向, 以期对黔西北及邻区同类型 REE 资源勘查有一定的指导意义。

1 稀土含矿层及 REE 矿化特征

1.1 稀土含矿层特征

稀土含矿层 (Pxt) 产出于宣威组 (P_{3x}) 底部, 假整合于峨眉山玄武岩组 (P_{2-3em}) 之上 (图 1), 沿虎家营向斜两翼分布, 延伸长约 37 km (图 1), 厚度受峨眉山玄武岩组 (P_{2-3em}) 起伏影响, 真厚 3.25 ~ 18.76 m。NW 向断裂 F6、F7、F8、F9、F10 对稀土含矿层完整性具有一定的破坏作用, 在东部受 F1 挤压作用, 向斜东翼稀土含矿层由北向南发生倒转。

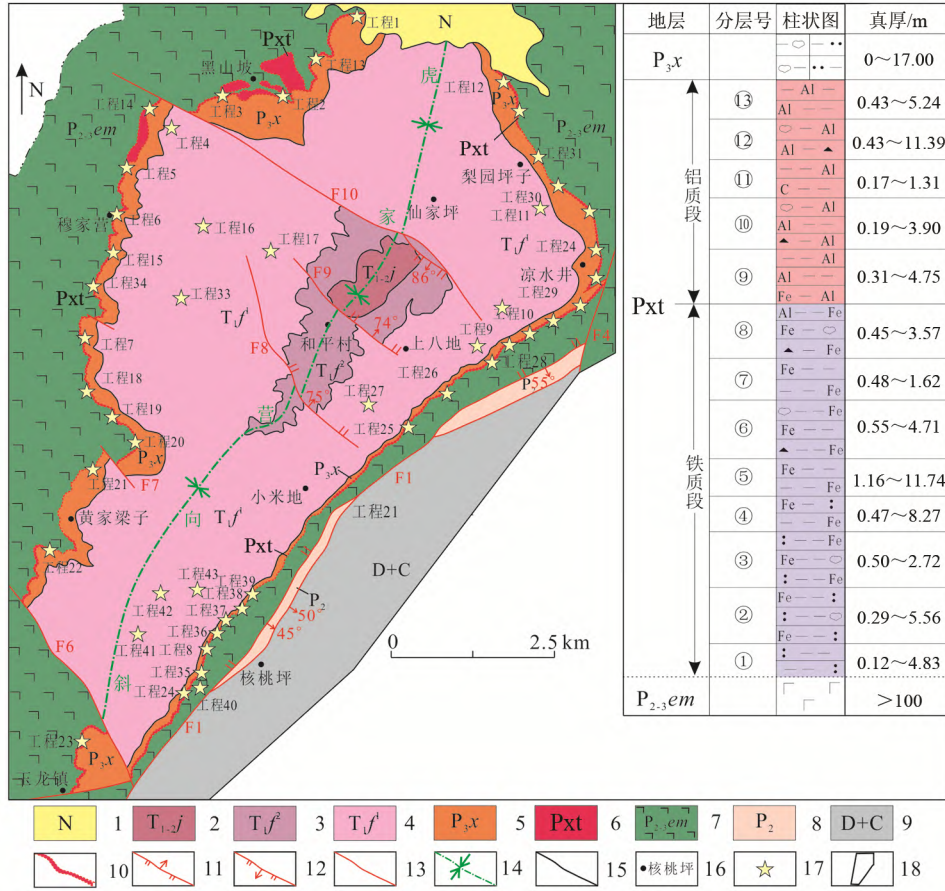
稀土含矿层根据主体岩性, 可分为下部铁质段、上部铝质段 (图 1), 在区内铁质段分布整体较稳定, 在向斜东翼南部地段存在变薄、缺失, 铝质段在部分地段存在缺失。铁质段主要矿物组合为赤铁矿、磁铁矿、高岭石、绿泥石、锐钛矿、云母等, 铝质段主要矿物组合为高岭石、勃姆石、一水硬铝石、锐钛矿、含钛伊利石、磷铝铈 (镧) 矿等, 次为钛铁矿、锐钛矿、绿泥石、锆石、金红石, 偶含氟石、方石英、烧绿石等。通过 60 个工程稀土含矿层特征, 建立区内稀土含矿层综合层序, 可划分为 13 个亚层, 由上往下描述如下:

上覆地层 宣威组 (P_{3x}): 砾岩/粉砂质泥岩。砾岩中砾石呈椭圆状 (图 2a), 粒径 1~50 mm 不等, 略具定向排列, 分选性差, 成分为硅质、玄武质、砂质, 胶结物为玄武质、泥质、砂质, 胶结紧密, 局部砾岩中见植物化石。该层在区内分布不稳定, 厚 0~17 m。在向斜西翼与稀土含矿层直接接触, 在向斜东翼与稀土含矿层间以一套粉砂质泥岩接触。

整合接触

稀土含矿层 (Pxt)

13 层: 浅灰色、灰色、灰白色致密状铝质泥岩 (图 2b), 具泥质结构, 见层理或层纹发育, 沿裂隙见褐色铁质浸染, 在向斜东翼偶含深色碳质, 分布不稳定, 厚 0.43~5.24 m。



1-第三系; 2-嘉陵江组; 3-飞仙关组二段; 4-飞仙关组一段; 5-宣威组; 6-稀土含矿层; 7-峨眉山玄武岩组; 8-中二叠系; 9-泥盆+石炭系; 10-Pxt 露头线; 11-逆断层; 12-正断层; 13-性质不明断层; 14-向斜轴; 15-地层界线; 16-地名; 17-工程位置; 18-研究区

图1 研究区地质略图与稀土含矿层 (Pxt) 综合柱状示意图

Fig. 1. Geological sketch map of the study area and columnar schematic diagram of the REE ore-bearing layer (Pxt).

12层: 浅灰色、灰色、黄绿色、紫褐色含碎屑/豆鲕致密状铝质泥岩 (图 2c、d), 具泥质结构, 碎屑、豆鲕构造, 偶见植物屑, 局部见层纹发育, 分布稳定, 厚 0.43~11.39 m。

11层: 深灰色薄层含碳质铝质泥岩、含碳质泥岩 (图 2e), 具泥质结构, 见植物屑和层纹, 分布在向斜东翼南部, 厚 0.17~1.31 m。

10层: 灰色、浅灰色、黄褐色、紫褐色 (含豆鲕、碎屑) 致密状铝质泥岩 (图 2f、g), 局部含铁质, 具泥质结构, 碎屑、豆鲕构造, 局部见层纹, 分布较稳定, 厚 0.19~3.90 m。

9层: 浅灰色、灰白色、紫褐色铝质黏土岩 (图 2h), 部分地段含铁质, 具泥质结构, 见贝壳状断口, 见层理或层纹, 分布较稳定, 深部因风化改造作用弱, 与地表肉眼下存在差异, 厚 0.31~4.75 m。

8层: 紫褐色 (含碎屑、豆鲕) 含铝质铁质黏土岩 (图 2i), 具泥质结构, 局部见层纹, 分布不稳定, 厚 0.45~3.57 m。

7层: 紫褐色、暗灰色、暗褐色铁质黏土岩, 局部见层纹, 不稳定, 向斜东翼南部基本缺失, 厚 0.48~1.62 m。

6层: 紫褐色、暗褐色含碎屑、豆鲕铁质黏土岩 (图 2j), 局部见层纹, 向斜西翼及东翼中部以北稳定, 向斜东翼南部基本缺失, 厚 0.55~4.71 m。

5层: 紫褐色、暗褐色夹灰白色铁质黏土岩, 局部见层纹, 向斜西翼稳定, 向斜东翼中部以南基本缺失, 厚 1.16~11.74 m。

4层：灰色、紫褐色、暗灰色含凝灰质铁质黏土岩，局部见层纹，分布较稳定，厚 0.47~8.27 m。

3层：紫褐色、暗灰色（含豆鲕）凝灰质铁质黏土岩（图 2k），局部见层纹，分布不稳定，厚 0.50~2.72 m。

2层：暗褐色、暗灰色（含豆鲕）铁质凝灰质黏土岩，局部见层理或层纹，分布不稳定，厚 0.29~5.56 m。

1层：深灰色、暗灰色、黄褐色凝灰质黏土岩（图 2l），局部见层理或层纹，分布稳定，厚 0.12~4.83 m。

假整合接触 -----

下伏地层 峨眉山玄武岩组 (P_{2-3em})：墨绿色致密状玄武岩，块状构造，节理发育，节理面平直光滑，内见褐色铁质浸染，局部见气孔和杏仁构造，风化面呈灰色，局部偶见球形风化，未见底，厚 > 100 m。



a-砾岩；b-致密状铝质泥岩；c-含碎屑铝质泥岩；d-豆鲕状铝质泥岩；e-含碳质铝质泥岩；f-含碎屑、植物屑铝质泥岩；g-含碎屑/豆鲕铁质铝质泥岩；h-铝质黏土岩；i-含碎屑/豆鲕铝质铁质黏土岩；j-豆鲕状铁质黏土岩；k-豆鲕状凝灰质铁质黏土岩；l-凝灰质黏土岩

图 2 稀土含矿层 (Pxt) 典型岩性组合

Fig. 2. Typical lithological assembly of the REE ore-bearing layer (Pxt).

1.2 REE 矿化特征

1.2.1 稀土品位特征

通过 60 个工程（图 1，工程分布于向斜两翼及深部，包括 41 个山地工程、19 个钻探工程）统计（表 1），稀土含矿层厚 3.25~18.76 m，平均真厚 10.13 m，单工程 REO 品位 0.06%~0.27%，平均品位 0.11%，其中铝质段厚 1.50~15.96 m，平均真厚 5.45 m，REO 品位 0.02%~0.71%，平均品位 0.14%；铁质段厚 0.12~15.99 m，平均真厚 5.10 m，REO 品位 0.03%~0.48%，平均品位 0.08%。通过铝质段与铁质段对比，铝质段稀土品位明显高于铁质段，高品位样品均出现在铝质段中，说明铝质段为稀土赋存有利地段。

表1 稀土含矿层 (Pxt)、不同岩性 REO 品位特征统计表

Table 1. Statistical table for characteristics of REO grades of different rocks from the REE ore-bearing layer (Pxt)

| 含矿岩系与主要岩性 | 工程数 | 样品数 | REO 品位/% | 备注 |
|-------------|-----|-----|----------------------|----------|
| Pxt | 60 | 737 | 0.06~0.27 (平均值 0.11) | 单工程品位与平均 |
| 铝质岩段 | 58 | 405 | 0.02~0.71 (平均值 0.14) | 单工程品位与平均 |
| 铁质岩段 | 60 | 332 | 0.03~0.48 (平均值 0.08) | 单工程品位与平均 |
| 含碎屑、豆鲕铝质泥岩 | 48 | 165 | 0.01~0.94 (平均值 0.12) | 单样品位与平均 |
| 含碳质铝质泥岩 | 11 | 20 | 0.07~1.05 (平均值 0.22) | 单样品位与平均 |
| 铝质黏土岩 | 34 | 92 | 0.01~1.38 (平均值 0.21) | 单样品位与平均 |
| 致密状铝质泥岩 | 42 | 128 | 0.01~0.67 (平均值 0.13) | 单样品位与平均 |
| 含豆鲕、碎屑铁质黏土岩 | 27 | 72 | 0.02~0.30 (平均值 0.08) | 单样品位与平均 |
| 含豆鲕凝灰质铁质黏土岩 | 6 | 10 | 0.03~0.25 (平均值 0.07) | 单样品位与平均 |
| 含铝质铁质黏土岩 | 21 | 44 | 0.02~0.33 (平均值 0.10) | 单样品位与平均 |
| 含铁质凝灰质黏土岩 | 16 | 34 | 0.03~0.48 (平均值 0.07) | 单样品位与平均 |
| 凝灰质铁质黏土岩 | 29 | 70 | 0.02~0.17 (平均值 0.07) | 单样品位与平均 |
| 凝灰质黏土岩 | 30 | 50 | 0.03~0.32 (平均值 0.08) | 单样品位与平均 |
| 铁质黏土岩 | 24 | 52 | 0.04~0.27 (平均值 0.08) | 单样品位与平均 |

1.2.2 稀土空间产出特征

通过各类探矿工程对比, 结合各赋矿岩性与产出空间, 区内稀土矿层可初步划分为7层(图3), 分布在第3、6、8、9、10、11、12层含矿岩系内, 以II、IV矿层为主, 稀土品位高、产出稳定、厚度大。

矿层I: 赋存于稀土含矿层(Pxt)铁质段, 呈似层状、透镜状产出, 产状与上覆宣威组地层产状基本一致, 赋矿岩性为铁质黏土岩、含豆鲕/碎屑铁质黏土岩、含豆鲕凝灰质铁质黏土岩、豆鲕状含铁质凝灰质黏土岩、含铝质铁质黏土岩。矿层厚0.36~1.90 m, 平均厚0.93 m, REO品位0.20%~0.48%, 平均品位0.26%。矿层主要分布于向斜西翼中部、南部与向斜东翼南部, 在区内具厚度小、不连续、品位低等特征。

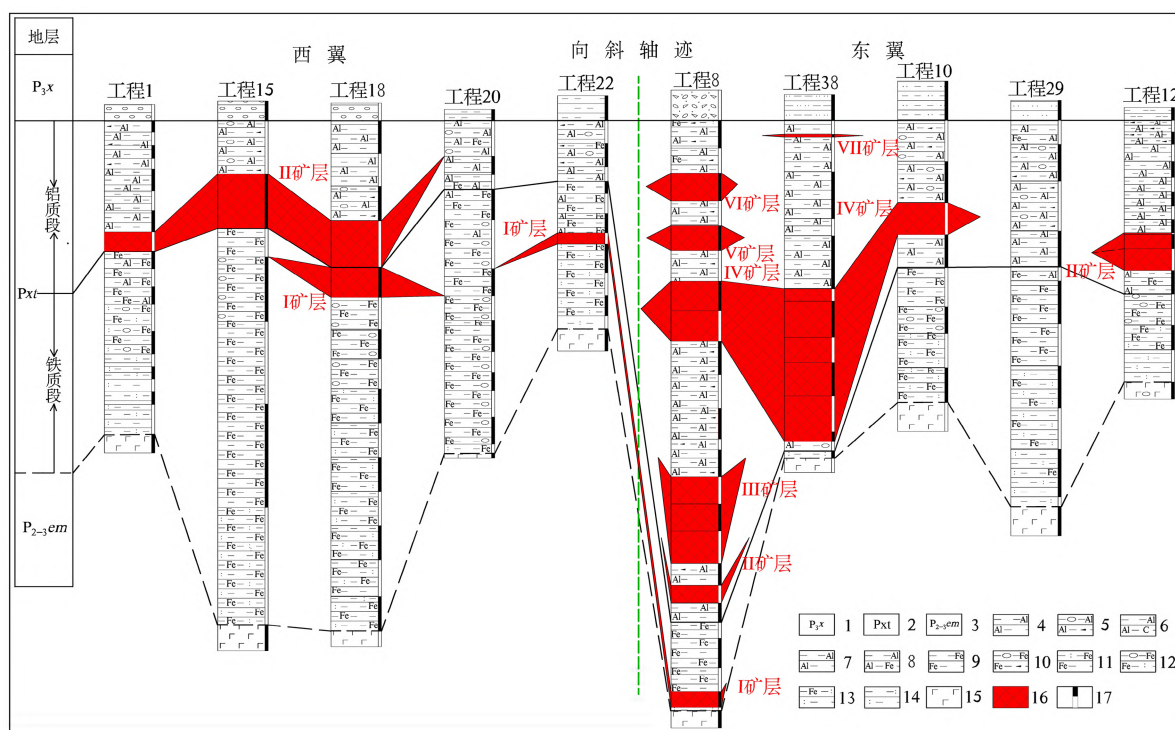
矿层II: 赋存于稀土含矿层(Pxt)铝质段底部, 呈层状、似层状产出, 产状与上覆宣威组地层产状基本一致, 赋矿岩性为(强风化)铁质铝质黏土岩、(强风化)铝质黏土岩、含碎屑/豆鲕铝质泥岩。矿层厚0.25~3.50 m, 平均厚1.20 m, REO品位0.18%~1.38%, 平均品位0.38%。矿层主要分布于向斜西翼中部以北、向斜东翼中部与南部, 在区内具厚度较大、连续较好、品位较高等特征。

矿层III: 赋存于稀土含矿层(Pxt)铝质段中下部, 呈透镜状产出, 产状与上覆宣威组地层产状基本一致, 赋矿岩性为铝质泥岩。按产出空间, 目前仅两个工程产出该矿层, 矿层厚1.36~2.75 m, 平均厚1.83 m, REO品位0.24%~0.64%, 平均品位0.50%。矿层分布于向斜东翼中部与南部, 在区内具厚度较大、不连续、品位较高等特征。

矿层IV: 赋存于稀土含矿层(Pxt)铝质段中部, 呈层状、似层状产出, 产状与上覆宣威组地层产状基本一致, 赋矿岩性为铝质泥岩、含碎屑/豆鲕铝质泥岩、含碳质铝质泥岩。矿层厚1.01~5.77 m, 平均厚2.93 m, REO品位0.23%~0.50%, 平均品位0.34%。矿层分布于向斜东翼中部、南部, 以向斜东翼南部为主, 在区内具厚度较大、连续较好、品位较高等特征。

矿层V、VI、VII: 矿层V、VI赋存于稀土含矿层(Pxt)铝质段上部, 呈透镜状产出, 矿层VII赋存于稀土含矿层(Pxt)铝质段顶部。矿层产状与上覆宣威组地层产状基本一致。矿层V仅两个工程可见, 赋矿为铝质泥岩、含碎屑铝质泥岩、碎屑状含碳质铝质泥岩, 矿层厚0.79~2.2.49 m, 平均厚1.64 m, REO品位0.21%~0.22%, 平均品位0.22%。矿层VI仅一个工程见, 矿层厚0.79 m, REO品位0.19%。VII矿层仅两个工程可见, 赋矿岩性为含碳质铝质泥岩, 矿层厚0.22~0.68 m, 平均真厚0.40 m, REO

品位为 0.19%~0.30%，平均品位 0.22%。矿层 V、VI、VII 分布于向斜东翼南部，在区内具厚度小、不连续、品位低等特征。



1-宣威组; 2-稀土含矿层; 3-峨眉山玄武岩组; 4-致密状铝质泥岩; 5-含碎屑、豆鲕铝质泥岩; 6-含碳质铝质泥岩; 7-铝质黏土岩(具贝壳状断口); 8-含铁质铝质黏土岩(局部见豆鲕、碎屑); 9-铁质黏土岩; 10-含碎屑、豆鲕铁质黏土岩; 11-含凝灰质铁质黏土岩; 12-含豆鲕凝灰质铁质黏土岩; 13-(含豆鲕)铁质凝灰质黏土岩; 14-凝灰质黏土岩; 15-玄武岩; 16-矿体; 17-采样位置

图3 稀土矿层空间产出特征

Fig. 3. Spatial occurring characteristics of the REE ore-bearing layers.

2 稀土矿化控制因素分析

2.1 基底古地貌形态制约稀土含矿层厚度

晚二叠世末，区内进入挤压隆升背景^[22]，峨眉山玄武岩随地壳抬升暴露地表，在炎热、潮湿古气候条件^[23]，发生大面积风化—剥蚀—去顶作用^[24]，受差异性抬升影响，不均匀风化、剥蚀引起基底地貌形态低洼起伏^[25-26]，基底不整合面凹、凸不平形态的制约，稀土含矿层厚度变化大。60个工程统计显示，稀土含矿层最薄 3.25 m，最厚可达 18.76 m，同一地段厚度变化较大，稀土含矿层厚度可由 10 m 向尖灭变化，这说明基底不整合面形态制约稀土含矿层厚度，进而影响稀土的矿化、富集。

2.2 构造对稀土含矿层影响

据已有资料^[27]，黔西北地区稀土含矿层(Pxt)主要沿向斜两翼及转折端分布，说明向斜构造有利于稀土含矿层保存，研究区稀土含矿层围绕虎家营向斜两翼分布亦如此。通过分析，区内已有断裂对稀土含矿层具有破坏作用(图1)。

2.3 岩相对稀土矿化的影响

从表1、图4可以看出稀土对岩性具有选择性富集，稀土含矿层铝质段稀土矿化明显强于铁质段，稀土品位高值样品均出现在铝质段内，铝质段中又以深灰色、灰黑色含碳质铝质泥岩、铝质黏土岩矿

化最为强烈, 次为致密状铝质泥岩、含碎屑、豆鲕铝质泥岩, 稀土对岩性矿化富集具体表现为: 含碳质铝质泥岩 (REO 品位 0.07%~1.05%, 平均 0.22%) > 铝质黏土岩类 (REO 品位 0.01%~1.38%, 平均 0.21%) > 致密状铝质泥岩 (REO 品位 0.01%~0.67%, 平均 0.13%) > 含碎屑、豆鲕铝质泥岩类 (REO 品位 0.01%~0.94%, 平均 0.12%) > 含铝质铁质黏土岩 (REO 品位 0.02%~0.33%, 平均 0.10%) > 含碎屑、豆鲕铁质黏土岩 (REO 品位 0.02%~0.30%, 平均 0.08%)、凝灰质黏土岩 (REO 品位 0.03%~0.32%, 平均 0.08%)、铁质黏土岩 (REO 品位 0.04%~0.27%, 平均 0.08%) > 含铁质凝灰质黏土岩 (REO 品位 0.03%~0.48%, 平均 0.07%)、含豆鲕凝灰质铁质黏土岩 (REO 品位 0.03%~0.25%, 平均 0.07%)、凝灰质铁质黏土岩 (REO 品位 0.02%~0.17%, 平均 0.07%)。

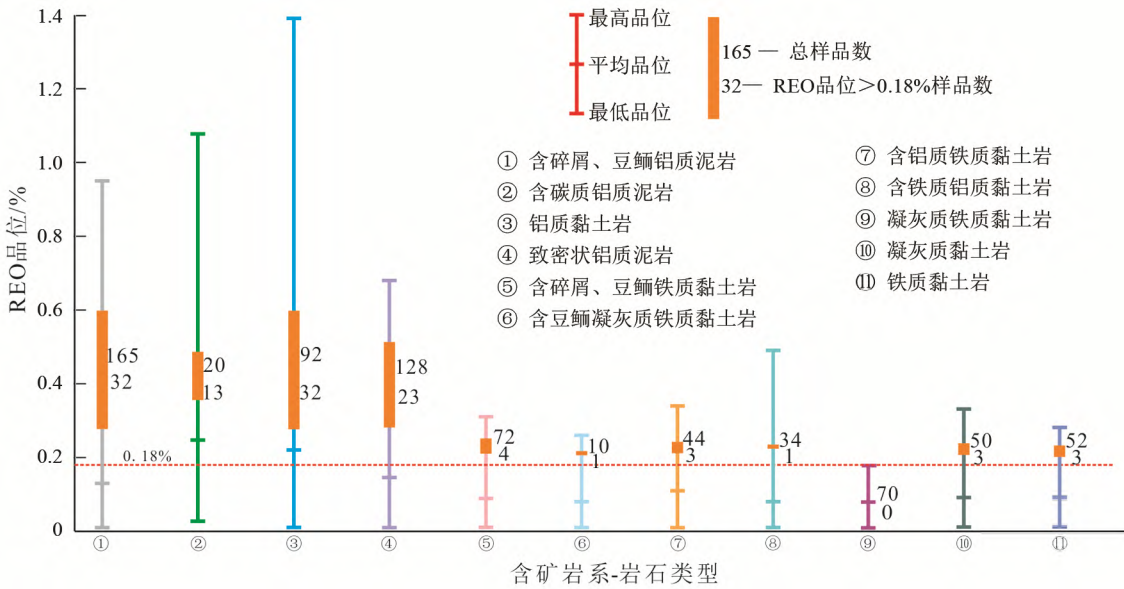


图 4 各类岩性稀土矿化对比
Fig. 4. Comparison of the REE mineralization in various rocks.

2.4 稀土含矿层厚度、完整性对稀土矿化的影响

通过单工程稀土含矿层厚度与稀土品位关系 (图 5), 稀土品位与 Pxt 厚度相关系数为 0.23, 反映出稀土矿化与稀土含矿层厚度关系不明显。此外, 从图中可以看出, 稀土含矿层厚度在 8~12 m, 有利于稀土富集。

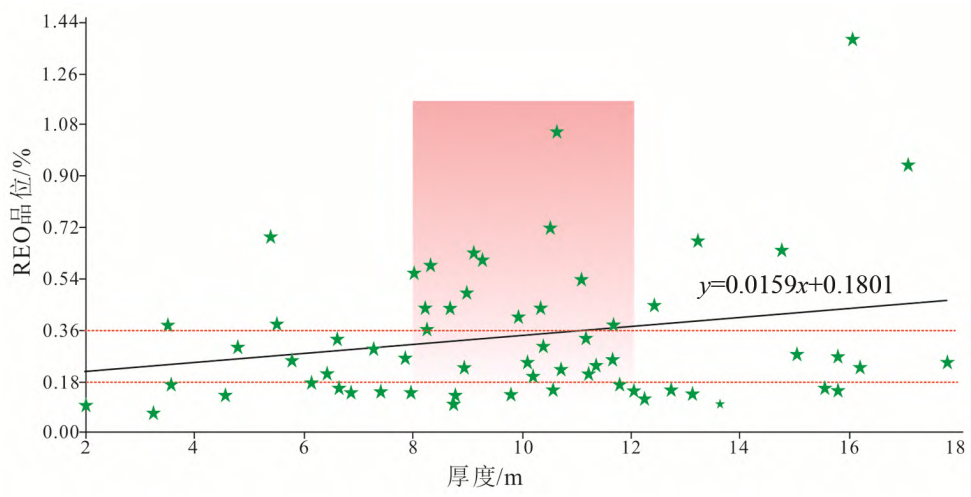
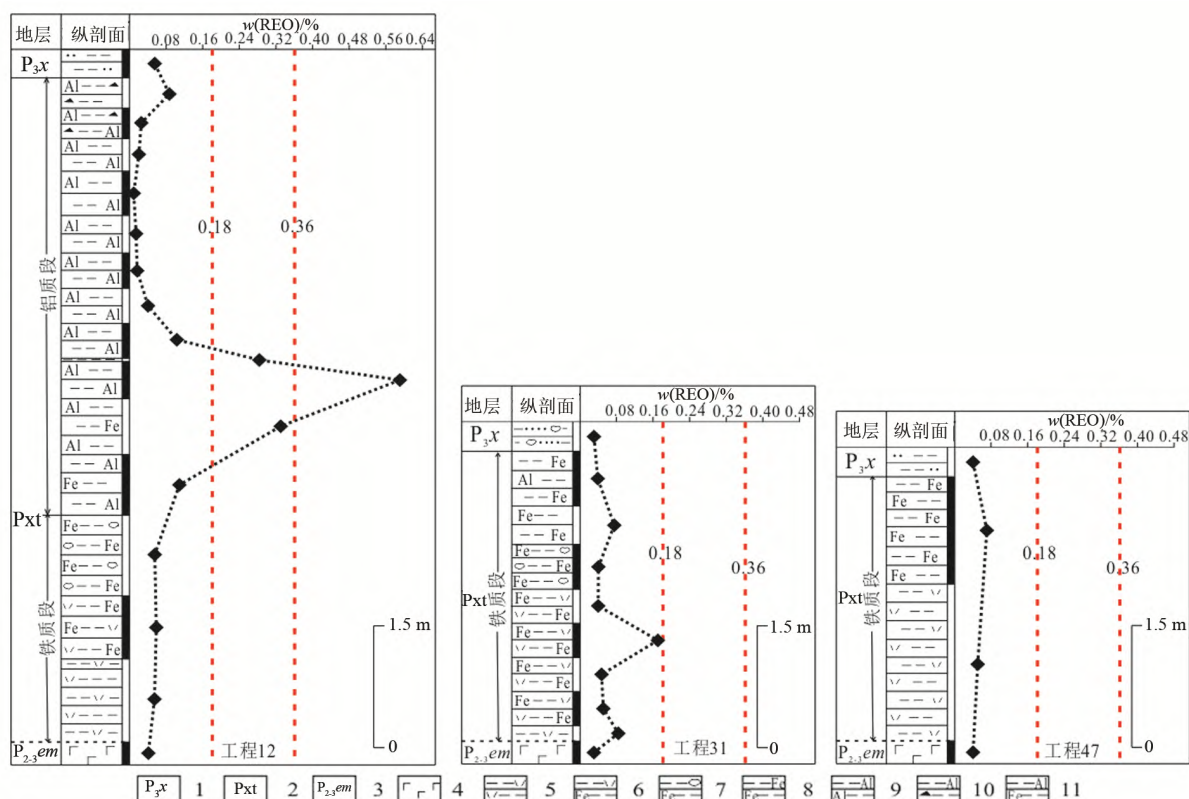


图 5 稀土含矿层稀土品位与厚度关系散点图
Fig. 5. Scattered diagram of the relationship between REO grades and thicknesses of the REE ore-bearing layer.

基于探矿工程分析结果统计,显示稀土含矿层完整性直接影响稀土矿化。以工程 12、工程 31、工程 47 为例(图 6):工程 12 稀土含矿层完整,稀土品位较高;工程 31、工程 47 缺失铝质段,稀土品位较低。此外,从图中可看出,铝质段为稀土富集的有利岩性段,即稀土含矿层是否有铝质段存在,是高品质稀土产出的直接影响因素。



1-宣威组; 2-稀土含矿层; 3-峨眉山玄武岩组; 4-玄武岩; 5-凝灰质黏土岩; 6-铁质凝灰质黏土岩; 7-含豆鲕铁质黏土岩; 8-铁质黏土岩; 9-铝质黏土岩; 10-含碎屑铝质黏土岩; 11-含铝质铁质黏土岩

图 6 稀土含矿层完整性对稀土富集影响

Fig. 6. Influence of integrity of the REE ore-bearing layers on the REE enrichment.

2.5 Nb_2O_5 、 ZrO_2 、TFe、A/S 与稀土矿化的关系

Nb_2O_5 、 ZrO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 含量、A/S 比值与 REO 品位相关系数分别为 0.13、0.10、0.13、0.02、0.06 (图 7), 反映它们之间关系不明显; TFe 含量与 REO 品位相关系数为 -0.21, 显示出 TFe 含量对稀土富集具有一定影响, 随着稀土含矿层中 TFe 含量增高不利于稀土富集的趋势。

从图 7 还可以看出, 对于不同的元素含量分段, 稀土具有相对富集区间, 表现为 $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ $130 \times 10^{-6} \sim 550 \times 10^{-6}$ 、 $w(\text{ZrO}_2)$ 0.06%~0.38%、 $w(\text{TFe})$ 7.94%~24.72%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 21.76%~40% 和 43.83%~59.04%、 $w(\text{SiO}_2)$ 16.15%~44.41% 及 A/S 比值 0.82~3.60 区间, 为 REO 品位 $\geq 0.18\%$ 集中分布区。通常情况下 A/S 比值越大, 表明改造脱硅作用越强烈, 而本次数据统计显示, A/S 比值 0.82~3.60 区间为 REO 品位 $\geq 0.18\%$ 集中分布区, 可能暗示稀土含矿层经历一定改造脱硅有利于稀土矿化富集, 而经历强烈淋滤改造脱硅 (A/S 比值 > 3.80), 可能引起稀土流失而贫化。

3 找矿方向分析

通过 41 个山地工程、19 个钻探工程揭露, 完整稀土含矿层由铁质段和铝质段组成 (图 1)。相比铁质段 (REO: 0.03~0.48%, 平均 0.08%), 稀土在铝质段 (REO: 0.02~0.76%, 平均 0.14%) 中更

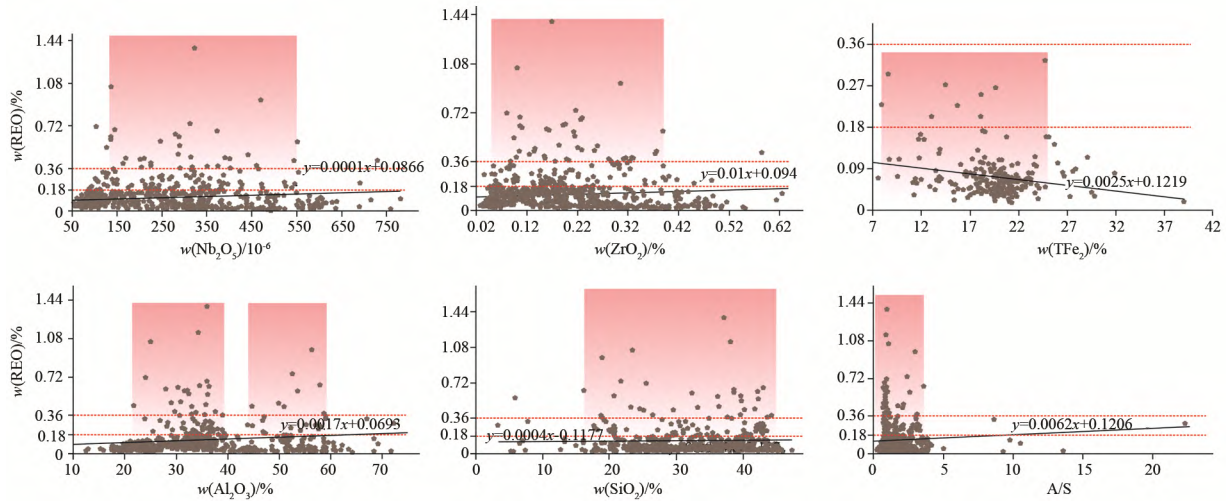


图 7 Nb₂O₅、ZrO₂、Al₂O₃、SiO₂、TFe 含量及 A/S 比值与 REO 品位关系散点图

Fig. 7. Scattered diagram of relationships respectively between Nb₂O₅, ZrO₂, Al₂O₃, SiO₂, TFe contents, A/S ratios and REO grades of various samples.

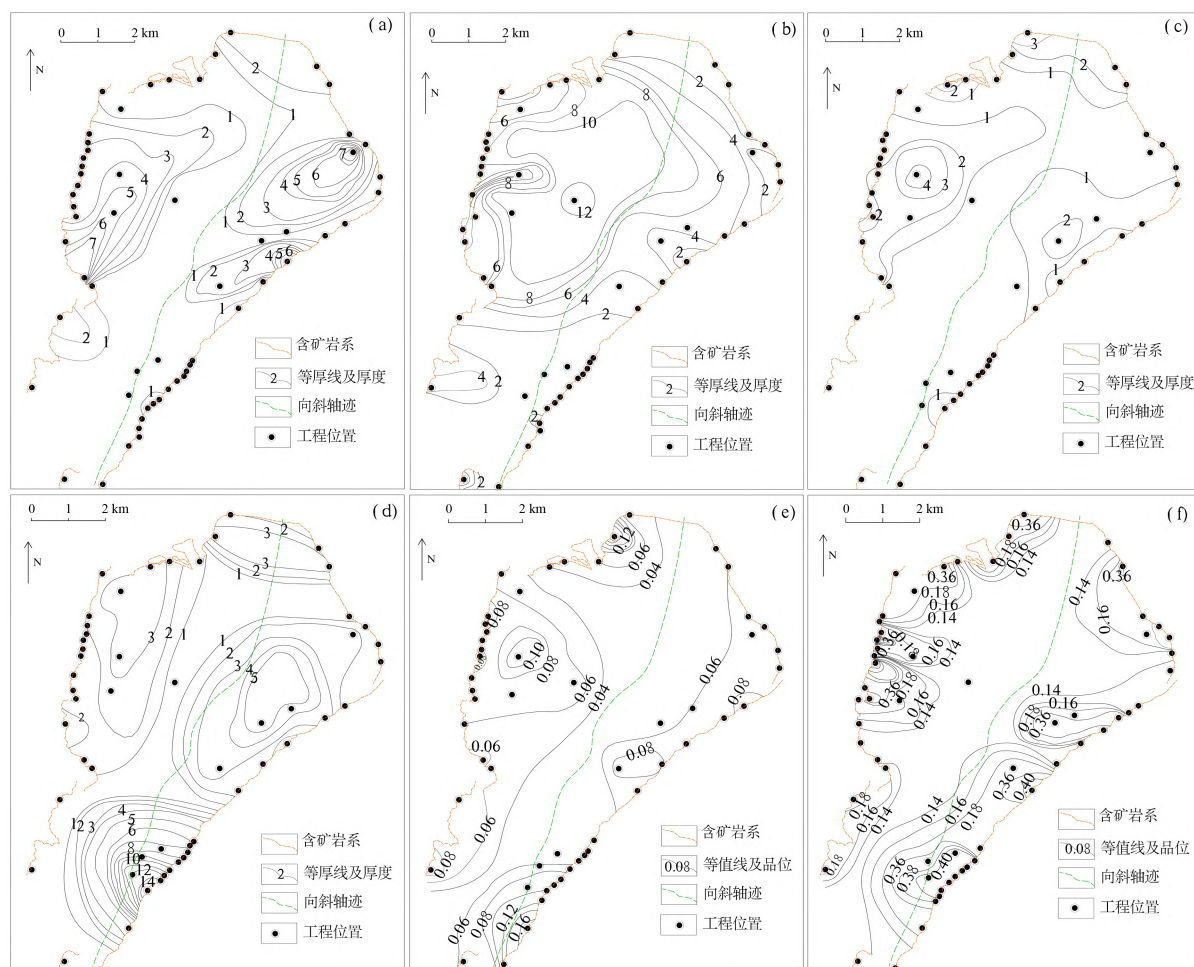
富集 (表 1), 图 6 直观反映出铝质段是高位品稀土产出的直接影响因素; 不同岩性稀土富集表现出明显的选择性, 铝质黏土岩 (REO: 0.01~1.38%, 平均 0.21%)、含碳质铝质泥岩 (REO: 0.07~1.05%, 平均 0.22%)、致密状铝质泥岩 (REO: 0.01~0.67%, 平均 0.13%)、含碎屑/豆鲕铝质泥岩 (REO: 0.01~0.94%, 平均 0.12%) 为稀土富集优势岩相, 铁质、凝灰质黏土岩类稀土品位普遍偏低 (表 1、图 4); 7 层稀土矿层中仅矿层 I 产于铁质段, 且厚度小、不连续、品位低, 其余矿层均产出于铝质段中, 以矿层 II、IV 厚度大、连续性好、品位高 (图 3)。综合上述分析, 稀土含矿层中铝质段存在与否, 是否具有铝质黏土岩、含碳质铝质泥岩、致密状铝质泥岩及含碎屑/豆鲕铝质泥岩等优势岩相存在, 直接决定了高位品稀土的产出, 故研究区铝质段连续产出, 且厚度大的地段, 为稀土找矿有利区。

图 8 显示研究区铝质段厚大地段主要分布于虎家营向斜东翼中部以南 (由北向南呈增厚趋势), 次为虎家营向斜西翼中部以北, 根据山地工程、钻探工程揭露显示, 稀土富集的优势岩相 (铝质黏土岩、含碳质铝质泥岩、致密状铝质泥岩、含碎屑/豆鲕铝质泥岩) 在向斜东翼南部均出现, 向斜西翼缺少含碳质铝质泥岩相。高位品稀土主要分布于虎家营向斜东翼中部以南 (由北向南稀土品位呈增高趋势), 次为虎家营向斜西翼中部以北 (图 8e、f), 通过前述分析, A/S 在 0.82~3.60 区间有利于稀土富集, 研究区向斜东翼南部 A/S 主要分布于 0.86~3.00 之间, 指示为稀土找矿有利区。综上, 认为研究区下一步找矿重点方向为虎家营向斜东翼中部以南地段, 次为虎家营向斜西翼中部以北地段, 尤其是虎家营向斜东翼南部铝质段厚度大 (现有工程统计铝质段真厚 4.46~12.42 m, 为目前发现区内铝质段厚度最大地段)、优势岩相组合齐全, 亦为高位品稀土分布连片地段, 为下一步勘查首选区。

4 结论

1) 稀土含矿层厚 3.25~18.76 m, 由铝质段、铁质段组成, 通过山地工程、钻探工程揭露稀土含矿层分析, 建立研究区稀土含矿层综合层序, 划分为 13 亚层。稀土矿层可划分为 7 层, 分布在第 3、6、8、9、10、11、12 层含矿岩系内, 以 II、IV 矿层为主, 稀土品位高、产出稳定、厚度大。

2) 稀土含矿层厚度受基底不整合面低洼起伏形态制约, 断裂构造对稀土含矿层完整性具破坏作用, 但断裂及影响带对稀土矿化富集是否具有影响, 有待进一步研究; 稀土矿化富集对岩性具选择性, 铝质段存在与否直接影响稀土富集; Nb₂O₅ 含量 130×10⁻⁶~550×10⁻⁶、ZrO₂ 含量 0.06%~0.38%、TFe 含量 7.94%~24.72% 及 A/S 比值 0.82~3.60 段区间, 为 REO 品位 ≥0.18% 集中分布区。



a. 凝灰质黏土岩类等厚线图; b. 铁质黏土岩类等厚线图; c. 铝质黏土岩类等厚线图; d. 铝质泥岩类等厚线图;
e. 铁质段稀土品位等值线图; f. 铝质段稀土品位等值线图

图8 稀土含矿层(Pxt)主要岩相等厚线图与单工程稀土品位等值线图

Fig. 8. Contour maps of thicknesses and REO grades of main rocks of the REE ore-bearing layer (Pxt).

3) 铝质段是高品质稀土产出的直接影响因素, 铝质黏土岩、含碳质铝质泥岩、致密状铝质泥岩、含碎屑/豆鲕铝质泥岩为稀土富集的优势岩相, 研究区铝质段厚大地段主要分布于虎家营向斜东翼中部以南, 且稀土富集优势岩相均有产出, 次分布于向斜西翼中部以北, 现有工程揭露高品质稀土主要分布于向斜东翼南部, 次为西翼中部以北, 认为研究区下一步找矿重点方向为虎家营向斜东翼中部以南地段, 次为虎家营向斜西翼中部以北地段, 尤其是虎家营向斜东翼南部铝质段厚度大, 优势岩相组合齐全, 为下一步勘查首选区。

致谢: 项目野外工作中得到贵州省土地矿产资源储备局与贵州省大精查办专家组悉心指导, 分析测试得到中国有色桂林矿产地质研究院矿产地质测试中心等单位及相关工作人员大力支持, 在此一并致以诚挚谢意!

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.
- [2] 侯增谦, 陈骏, 翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3651-3652.
- [3] 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, 53(4): 328-333.
- [4] Yang R D, Wang W, Zhang X D, et al. A new type of rare earth elements deposit in weathering crust of Permian basalt in western Guizhou, NW China[J]. Journal of Rare Earths, 2008, 26: 753-759.
- [5] Zhou L J, Zhang Z W, 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.
- [6] 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.
- [7] 陈智, 郑禄林, 陈军, 侯林洋, 田亚江. 贵州威宁玉龙铈矿稀土富集层的发现及其成矿意义[J]. 稀土, 2017, 38(6): 117-124.
- [8] Gong D X, Hui B, Dai Z M, et al. A New Type of REE Deposit Found in Clay Rock at the Top of the Permian Emeishan Basalt in the Yunnan-Guizhou Area[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2020, 94(1): 204-205.
- [9] 汪龙波, 高军波, 杨瑞东, 等. 黔西北上二叠统宣威组底部富铈多金属层地球化学特征研究[J]. 地质论评, 2020, 66(6): 1696-1709.
- [10] 刘阳, 付勇, 周祖虎, 等. 黔西北上二叠统峨眉山玄武岩风化壳中铈富集机制初探[J]. 矿床地质, 2021, 40(4): 776-792.
- [11] 袁民油, 蔡国盛, 曾道国, 等. 贵州西部二叠统峨眉山玄武岩顶部古风化壳铈-铈-稀土矿化富集层的发现与意义[J]. 矿物学报, 2021, 41(4/5): 531-547.
- [12] 苏之良, 薛洪富, 金中国, 等. 黔西北峨眉山玄武岩顶部 Fe-Al 岩系铈、铈、稀土分布特征与富集规律[J]. 矿物学报, 2021, 41(4/5): 520-530.
- [13] 薛洪富, 曾道国, 向明坤, 等. 黔西北峨眉山玄武岩顶部 Fe-Al 岩系特征及其三稀元素富集特点[J]. 中国地质调查, 2021, 8(5): 25-34.
- [14] Deng W, Wen H J, Du S J, et al. Provenance of Late Permian Nb-Zr-REE-Ga enrichment in western Guizhou: Implications for the waning volcanism of Emeishan large igneous province[J/OL]. Ore Geology Reviews, 2022, 150: 105160. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105160>
- [15] 刘国栋. 峨眉山玄武岩风化壳中铈的赋存形式及富集机制研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [16] Zhang Z W, Zheng G D, Takahashi Y, et al. Extreme enrichment of rare earth elements in hard clay rocks and its potential as a resource. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 191-212.
- [17] 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.
- [18] 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, 23(4): 366-370.
- [19] 杨瑞东, 鲍淼, 廖琍, 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.
- [20] 中国地质调查局成都矿产综合利用研究所. 川滇黔相邻区古陆相沉积型稀土综合调查评价[R]. 科研报告, 2023.
- [21] 中国地质调查局成都矿产综合利用研究所. 黔西北地区沉积型稀土普查阶段一般工业指标论证报告[R]. 科研报告, 2022.
- [22] 贵州省地矿局. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- [23] 郭英廷. 贵州西部晚二叠世古气候[J]. 中国煤田地质, 1990, 2(3): 18-20.
- [24] 郑启铃. 贵州境内峨眉山玄武岩的基本特征及其与成矿作用的关系[J]. 贵州地质, 1985, 2(1): 1-11.
- [25] 曹励训. 贵州威宁晚二叠世古风化壳铝土矿[J]. 贵州地质, 1995(1):54-55.
- [26] 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.
- [27] 薛洪富, 向明坤, 忙是材, 等. 贵州省新兴产业矿产资源调查评价[R]. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院, 2020.