

云南宣威—罗平稀土(铁、钛)多金属矿 成矿机理及找矿前景

杨平, 马亚雄, 张道红, 江洪飞, 白磊, 汪永华

云南省有色地质局地质研究所, 云南昆明 650216

摘要: 云南东部宣威—罗平一带, 在二叠纪玄武岩两大喷发旋回顶部的古风化壳中, 发现两层稀土、铁、钛多金属矿化层: REO 0.016%~0.52%、TFe 10.09%~49.44%、TiO₂ 1.08%~10.94%; 含矿层厚度 8.0~35.0 m; 矿化体分布广, 呈层状、似层状。矿化层的形成经历了源(富稀土、铁、钛的玄武岩)—转(古风化淋积作用)—储(有利古地理环境)的成矿机理, 成为稀土、铁、钛多金属矿极具潜力的远景区。

关键词: 稀土; 铁; 钛多金属矿; 古风化壳; 成矿机理; 找矿前景

中图分类号: TG146.45; P611 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2013.s1.32

Metallogenic Mechanism and Ore-searching Prospect of REE (Fe, Ti) Polymetallic Deposits in Xuanwei-Luoping Area, Yunnan Province

YANG Ping, MA Ya-xiong, ZHANG Dao-hong, JIANG Hong-fei, BAI Lei, WANG Yong-hua

Institute of Geology, Yunnan Nonferrous Metals Geological Bureau, Kunming, Yunnan 650216

Abstract: In Xuanwei—Luoping area of eastern Yunnan Province, two REE, Fe, Ti polymetallic mineralized beds were discovered at the tops of paleoweathering crusts formed by two eruptive cycles of Permian basalts. The thickness of the ore-bearing beds is 8.0~35.0 m, and they contain Σ REE 0.016%~0.52%, TFe 10.09%~49.44% and TiO₂ 1.08%~10.94%. Mineralized bodies are widely distributed and assume stratified and stratoid forms. The formation of the mineralized bed experienced the metallogenic mechanism of initial source formation (basalts rich in REE, Fe and Ti) —transformation (leaching and infiltration of paleoweathering crust) —storage (stored in favorable paleogeographic environment), and hence this area has become a prospective area of great potential for REE, Fe, Ti polymetallic deposits.

Key words: REE; iron; titanium, polymetallic deposit; paleoweathering crust; metallogenic mechanism; ore-searching prospect

近年来, 云南省有色地质局有关单位在云南东部的宣威—罗平一带, 通过对二叠纪峨眉山玄武岩有关的稀土、铁、钛多金属矿的调查工作, 发现在玄武岩喷发旋回(P₂^{β^a}、P₂^{β^b})之间的古风化壳中、以及在玄武岩顶部(P₂^{β^b})与宣威组(P₂^x)底部之间的界面中, 分别形成有两个稀土、铁、钛多金属矿含矿层(图 3)。含矿层: Σ REE 0.016%~0.52%; TFe

10.09%~49.44%; TiO₂ 1.08%~10.94%; 厚度 8.0~35.0 m。铁矿物以赤铁矿为主, 钛矿物为锐钛矿, 稀土以微细粒的独居石等矿物为主, 并含部分离子吸附稀土。稀土矿、铁矿、钛矿呈“多元同层或多元同体”的共生关系。矿化层厚度大, 分布范围广, 具稳定层位, 为一种新类型的稀土、铁、钛多金属矿(古风化淋积-沉积型), 远景资源量大, 具有重要的勘

收稿日期: 2013-04-23; 改回日期: 2013-05-07。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 杨平, 男, 1963年生。高级工程师。长期从事矿产普查及勘探工作。通信地址: 650216, 云南省昆明市盘龙区昙小路一号。电话: 0871-63855167。E-mail: ynk001@.com。

查价值。

调查区位于扬子地块西南缘的次级构造单元—曲靖台褶束的宣威凹褶和富源—罗平凹褶。扬子地块经晋宁运动褶皱回返后,在晚古生代至中三叠世地块演化过程中形成三个构造亚层,其中宣威凹褶、富源—罗平凹褶属第三构造亚层的组成部分,自上而下分为下三叠统法郎组(T_{1f})河湖相红色碎屑岩建造、上二叠统宣威组(P_{2x})含煤碎屑岩建造、晚二叠世峨眉山玄武岩($P_2\beta$)陆相火山岩建造和下二叠统茅口组(P_{1m})浅海碳酸盐岩建造。

峨眉山玄武岩($P_2\beta$)广泛分布于川、滇、黔地区,一般将其分为三个岩带(图 1):西为程海断裂—丽江—箐河玄武岩带;中为安宁河断裂—渡口玄武岩带;东为小江断裂—金阳玄武岩带。玄武岩厚度变化较大,自西往东厚度变薄。云南宣威—罗平一带的玄武岩处于东带东缘,玄武岩呈喷发角度不整合覆盖于茅口组之上,大体上可以分为上、下两大喷发旋回($P_2\beta^b$ 、 $P_2\beta^a$),期间存在一次较大的喷发间歇期(云南省地矿局第二区域地质调查队,1977)。东带玄武岩的 Σ REE、Fe、Ti 明显比世界玄武岩偏高(表 2)。

这一地区发育有一系列北东向的缓倾开阔型向斜构造。沿向斜构造翼部或核部广泛出露的峨眉山

玄武岩顶部($P_2\beta^b$)与宣威组底部(P_{2x})的过渡界面,及峨眉山玄武岩两大喷发旋回($P_2\beta^a$ 、 $P_2\beta^b$)间歇期界面内,分别形成与玄武岩古风化作用有密切成因联系的淋积-沉积型稀土、铁、钛多金属矿体,分为上(I)、下(II)两个含矿层(图 3)。含矿层的延展分布稳定,构成区内独立的成矿单元,含矿层的厚度受基底起伏、岩相古地理条件控制而有不同的变化。含矿层内分布的稀土、铁、钛多金属矿床为多元同层共生型,属部分组分达到工业品位——主要组分都达到工业品位相结合的综合类型。

1 稀土、铁、钛多金属矿床地质特征

稀土、铁、钛矿赋存于玄武岩古风化壳或古侵蚀界面内的半硬质铁质粘土岩、粘土岩中,具成层性特征,矿化体呈似层状和透镜状产出。据 63 个采样点,260 件基本分析(杨平等,2011,2012): Σ REO 0.016%~0.52%;TFe 10.09%~49.44%; TiO_2 1.08%~10.94%;含矿层厚度 8.0~35.0 m。

矿床的成因属于以峨眉山玄武岩为物源,经古风化淋积作用,近距离运移,就地富集的原地-半原地淋积、沉积类型。矿床的工业类型为稀土矿、赤铁矿、锐钛矿共生的粘土吸附型-混生型(内含稀土载体矿物),并含 Co、Nb、Zr、Ga、 K_2O 等伴生有益元素。

1.1 稀土矿床特征

区内分布的稀土矿床,经野外调查及多种测试分析手段(人工重砂、X-射线粉晶分析及电子探针)查定,稀土富集在玄武岩古风化土、铁质粘土和杂色粘土层中。稀土矿具有下列特征:

(1) 稀土矿石成分及化学含量

矿石成分为:氧化物类——赤铁矿为主、少量褐铁矿、锐钛矿及石英等,约共占 42%;硅酸盐类——高岭石、绢云母为主、少量或微量绿泥石、锆石、石榴石、电气石等,约共占 57%;磷酸盐类——独居石约占 0.4%;硫化物类——黄铁矿等偶见。据此分析玄武岩的古风化淋滤作用进行得比较彻底,古风化壳内的矿物组合成熟度较高。上述矿物成分中的稀土载体矿物种类、矿物中的稀土含量及稀土元素在矿物中的分配率,需进一步查定。

据 260 件稀土总量分析(杨平等,2012):上含矿层(I)的 Σ REO 为 0.016%~0.52%,平均 0.095%;下含矿层(II)的 Σ REO 为 0.02%~0.16%,平均 0.072%。

(2) 稀土元素配分特征

据区内十余件稀土全分析结果,将上含矿层(I)

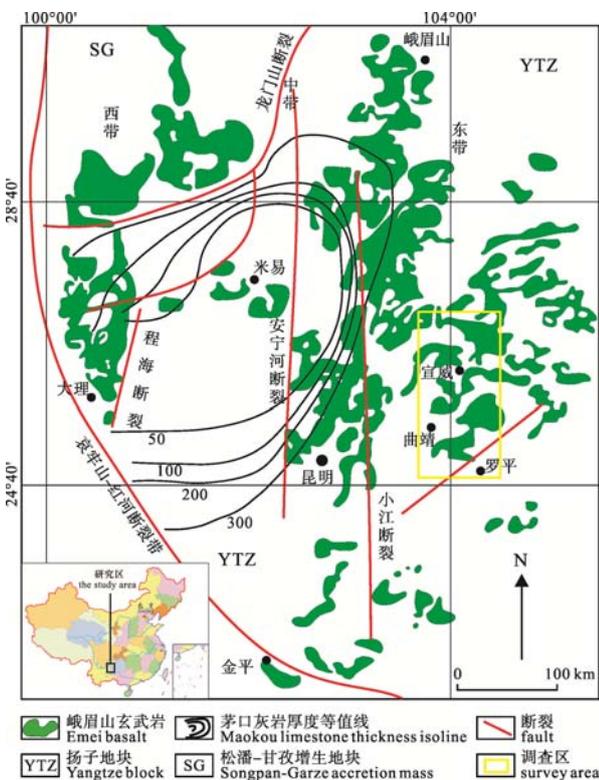


图 1 晚二叠世峨眉山玄武岩分布图
(据胡瑞忠等,2005 修改)

Fig. 1 The distribution of Late Permian Emeishan basalt
(modified after HU et al., 2005)

的稀土矿体按三分组(轻、中、重稀土)及其主要组分进行配分计算,为矿床主要工业矿物有用组分的评价提供趋势性预测,其结果如下:

轻稀土段(La-Nd): $LREE/\sum REO$ 为 63.8%~87.44%, $LREE$ 含量为 621.8×10^{-6} ~ 3749×10^{-6} 。其中主要组分: $Ce/\sum REO$ 为 21.2%~46.17%, Ce 含量为 218×10^{-6} ~ 1404×10^{-6} ; $Nd/\sum REO$ 为 10.63%~21.26%, Nd 含量为 88.3×10^{-6} ~ 903×10^{-6} , 具有强烈变化,或具有含钷的载体矿物生成。

中稀土段(Sm-Ho): $MREE/\sum REO$ 为 7.06%~14.6%, $MREE$ 含量为 81.16×10^{-6} ~ 424.7×10^{-6} 。其中偶数元素 Sm、Gd、Dy 含量相对较高: $Sm/\sum REO$ 为 1.78%~4.29%, Sm 含量为 14.0×10^{-6} ~ 102×10^{-6} ; $Gd/\sum REO$ 为 2.14%~14.16%, Gd 含量为 16.8×10^{-6} ~ 104×10^{-6} ; $Dy/\sum REO$ 为 1.31%~3.60%, Dy 含量为 15.4×10^{-6} ~ 99.8×10^{-6} 。

重稀土段(Er-Lu+Y): $HREE/\sum REO$ 为 4.63%~21.6%, $HREE$ 含量为 63.29×10^{-6} ~ 621.17×10^{-6} 。其中钇(Y)含量较高,占据了重稀土组的绝大部分, $Y/\sum REO$ 为 3.43%~17.68%, Y 含量为 48.5×10^{-6} ~ 493×10^{-6} , 平均 170×10^{-6} 。当 Y 含量增加时,相应的 Er、Yb、Dy、Gd、Sm 亦同步上升,显示有含钇(Y)为主并具多种稀土成分的载体矿物加入。

(3)稀土元素球粒陨石标准化及偶奇数效应图解

对上含矿层(I)、下含矿层(II)及玄武岩的稀土全分析样品,进行了球粒陨石标准化图解(里德球粒陨石)(图 2),具有以下特点:

由玄武岩至下含矿层(II)、上含矿层(I),稀土含量逐步增加,三者球粒陨石曲线具有相似性和继承性,表明含矿层与玄武岩有密切的成因联系。球粒

陨石标准化曲线均为向右倾斜的轻稀土富集、重稀土略具亏损,并有 Eu 的负异常和局部 Ce 的弱负异常型。其中,轻稀土段的斜率为缓至中等倾斜,中、重稀土段呈平缓下降。 Ce 和 Eu 的亏损与 Ce^{3+} 转变为 Ce^{4+} 、 Eu^{2+} 转变为 Eu^{3+} 的地球化学特征有关,与其他元素分离形成负异常。

稀土矿体的稀土分量组成具有明显的偶、奇数效应,或称奥多-哈金斯法则,即镧系 15 个元素按原子序数 57—71(La-Lu)排列,其中偶数元素的稀土含量均大于相邻两个奇数元素的稀土含量,两者差值一般均在一个数量级之间变化,且逐步降低,并与玄武岩的相应元素的高、低值对应,显示两者存在生因联系(图 2)。

1.2 铁、钛矿床特征

区内分布的铁、钛矿床属残积-再沉积的古风化壳型,赋存于峨眉山玄武岩界面之上的上(I)、下(II)矿层内的粘土岩中,属需经选矿的矿石类型。铁、钛矿体呈规模不等的似层状,大透镜状产出,含矿层由铁质粘土岩和浅色、杂色粘土岩组成。在铁质粘土岩中铁、钛的含量相对较高(杨平等, 2011): TFe 最高含量为 49.44%, 一般为 19%~23%; TiO_2 最高含量为 10.94%, 一般为 4%~6%; 铁和钛具有非线型的正相关关系。在浅色、杂色粘土岩中铁、钛的含量相对较低: TFe 含量为 10.09%~18.29%, TiO_2 含量为 1.08%~4.16%。据“矿产资源工业手册”类比的参数指示: 边界品位 TFe 18%, 工业品位 TFe 20%, 及锐钛矿工业品位 TiO_2 2% 进行矿区远景评价,按照现有自然露头采样工程控制,可圈出铁矿体厚 1.5~22.18 m, 品位为 TFe 20%~22.98% 及 TFe 为 26.82%~40.2% 品级的铁矿体, 以及厚度相当的钛矿

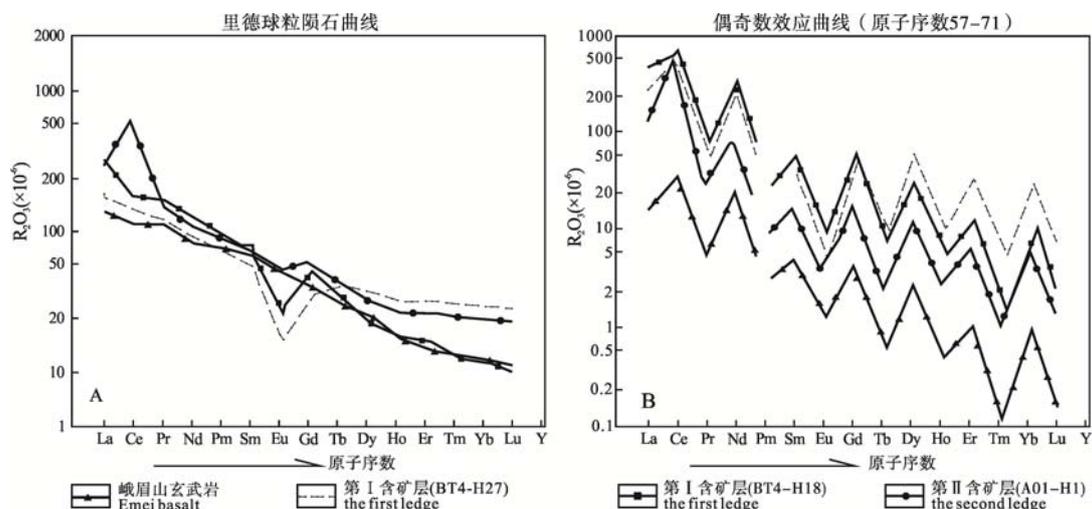


图 2 玄武岩与含矿层中稀土元素球粒陨石标准化(A)、偶奇数效应对比曲线(B)图

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of basalt and ore-bearing bed (A) and even-odd effect comparison curve (B)

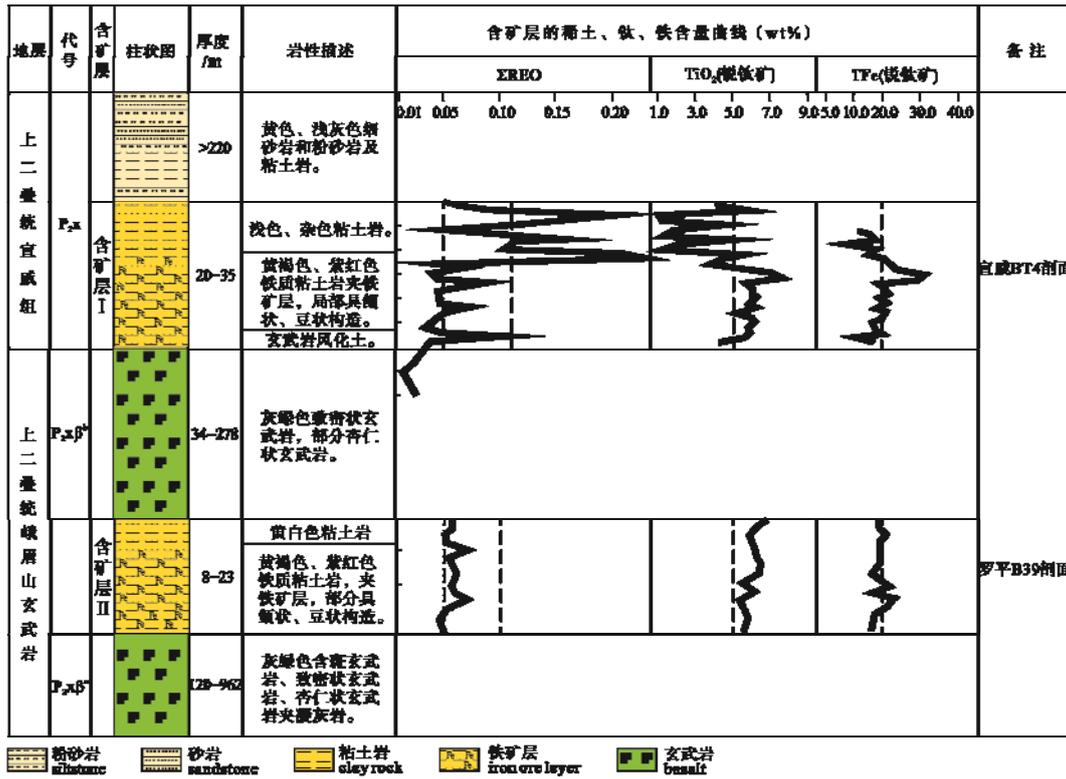


图 3 宣威—罗平稀土(铁、钛)多金属含矿层及含矿性柱状图

Fig. 3 Columnar section of REE (Fe, Ti) polymetallic ore-bearing bed and ore potential in Xuanwei-Luoping area

体，品位为 TiO₂ 4.2%~5.84%。

鉴于铁、钛矿体与稀土矿具有同体共生特征，为充分利用矿石资源，分含矿层位按现有采样件数以圈定稀土矿为主的基础上，分别对铁、钛矿进行了平均品位计算(表 1)。

矿石的矿物组成：矿石矿物以赤铁矿为主(含泥状赤铁矿)，少量褐铁矿、锐钛矿(含泥状锐钛矿)，偶见磁铁矿、锆石、石榴石、电气石、独居石等，约共占 35%~60%；脉石矿物以高岭石为主及少量绢云母、石英等，约共占 30%~55%。矿物的粒度组成大致可分为 0.1~0.3 mm 级和 0.004~0.1 mm 级，后者的矿物成分由 X 射线粉晶衍射确定，包含泥状赤铁矿(约 20%~30%)、泥状锐钛矿(约 5%~10%)，高岭石(20%~45%)、石英(1%~5%)。矿石的结构为它形粒状、砂屑状、胶状、鲕粒状等，由泥质物填隙。

2 矿床成矿机理

滇东地区晚二叠世玄武岩古风化壳内的稀土、

铁、钛多金属矿的形成与富稀土、富铁、富钛的玄武岩，及较长时间玄武岩浆的喷溢间歇期或沉积间隙期，以及有利的古气候环境、古地理环境等条件的多要素耦合有关，经历了源(物质来源)—转(古风化淋滤)—储(古地理环境)的成矿过程。

2.1 成矿物质来源

峨眉山玄武岩按 TiO₂ 含量分为高钛玄武岩和低钛玄武岩(姜寒冰等, 2009)：高钛玄武岩集中于东带(小江断裂及昭通—曲靖隐伏断裂带)，高钛玄武岩的稀土、铁含量高；低钛玄武岩分布在中带、西带，并构成峨眉山玄武岩的主体(图 1)，其稀土、铁含量相对较低(表 2)。徐义刚等(2001)对峨眉山大火成岩省岩石地球化学及地幔柱动力学效应开展了综合研究，认为：低 Ti 玄武岩主要为地幔柱岩浆活动早期中心部位岩石圈高度拉张减薄环境下大量地幔上涌、高程度部分熔融作用形成；高 Ti 玄武岩则是在地幔柱活动相对较弱的阶段，特别是地幔柱活动中

表 1 宣威—罗平玄武岩古风化淋积层稀土、铁、钛含量(wt%)

Table 1 REE, Fe and Ti content (wt%) of paleoweathering illuvium in Xuanwei-Luoping area

含矿层位及共生矿体	ΣREO	TFe	TiO ₂	样品数(件)	备注
上含矿层(I)	0.095	19.09	4.20	159	铁质粘土岩、杂色粘土岩
下含矿层(II)	0.072	19.62	5.84	101	铁质粘土岩

注：样品测试由云南省有色地质局测试分析中心和国土资源部昆明测试分析中心完成。

表 2 峨眉山玄武岩、玄武岩古风化壳主要化学成份(wt%)、稀土含量($\times 10^{-6}$)

Table 2 Major chemical composition (wt%) and REE content ($\times 10^{-6}$) of Emeishan basalt and paleoweathering crust of basalt

岩石类型	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	[FeO]	∑REE	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
玄武岩古风化壳 II(8)★	27.41	6.08	20.90	33.38	730	0.32	0.066	0.21	1.86
滇东高钛玄武岩(20)▲	48.23	3.61	13.35	14.36	249	4.55	7.85	2.99	1.07
滇西低钛玄武岩(10)▲	49.09	2.00	13.42	11.12	124	6.24	10.98	2.42	0.78
峨眉山玄武岩(865)△	49.46	3.22	13.77	13.65	162(17)	5.80	8.52	2.83	1.29
世界玄武岩平均值○	49.20	1.84	15.74	10.92	134◇	6.73	9.47	2.91	1.10
高原玄武岩(戴里)	48.80	2.19	13.98	13.37		6.70	9.38	2.59	0.89

注: [FeO] = Fe₂O₃+FeO; (865)括号内的数字为样品数; 数据来源: ★本文; ▲姜寒冰等, 2009; △潘杏南等, 1987; ○肖荣吾, 1988; ◇王崇云, 1986.

心的边缘地带、岩石圈较厚、熔融程度相对较低的条件下形成。

海西运动晚期, 随着峨眉山热柱的活动, 川—滇—黔区域地壳发生张裂, 峨眉山玄武岩浆大量喷溢, 峨眉山玄武岩东带处于地幔热柱的边缘或边部(胡瑞忠等, 2005), 由于地幔物质部分熔融程度低(邓晋福等, 2004)或地幔分异的差异性, 形成富含稀土、铁、钽的玄武岩(表 2): ∑REE 249 $\times 10^{-6}$; TiO₂ 3.61%; (Fe₂O₃+FeO) 14.36%。与峨眉山低钛玄武岩及世界玄武岩相比, 东带玄武岩的 ∑REE、(Fe₂O₃+FeO)、TiO₂ 明显偏高。

由玄武岩与玄武岩古风化壳中的稀土、铁、钽含量(图 2, 表 2)对比分析: 二者的稀土配分曲线十分相似, 为平缓右倾的轻稀土富集型, 并具有明显的钕负异常。古风化壳中的稀土配分含量高于玄武岩, 并且稀土偶、奇元素值高低对应。显示其在继承了玄武岩稀土配分特征基础上进行了稀土富集。同时, 玄武岩古风化壳中的硅、镁、钙、钠明显低于玄武岩(大量淋失), 铁、钽含量显著高于玄武岩(明显富集), 说明稀土、铁、钽多金属矿是由玄武岩中的稀土、铁、钽元素通过风化淋滤富集形成的。因此, 大面积分布的富稀土、富铁、富钽玄武岩, 成为稀土、铁、钽多金属矿的重要物质来源。

2.2 古风化淋滤

古气候环境: 据刘成英等(2011)的古地磁研究, 晚二叠世扬子块体处于南半球低纬度地区。滇东地区晚二叠世宣威组下部煤层较为发育, 玄武岩顶部的古风化壳往往表现为厚大“红顶”及古风化壳内的矿物组合成熟度较高。据此分析, 这一地区古气候环境属氧化-湿热环境, 由于气候湿热, 雨量充沛, 因而化学风化作用进行得十分强烈并不断向深部发展, 在这种环境中, 下渗水和土壤溶液一般具有中性到碱性的反应, 元素易发生大量迁移和富集, 形成厚大的风化壳。在风化壳中由于碱性阶段占优势,



图 4 滇、黔、桂地区晚二叠世龙潭期岩相古地理图 (据冯增昭等, 1994 修改)

Fig. 4 Lithofacies-paleogeographic map of the Late Permian Longtan period in Yunnan-Guizhou-Guangxi area(modified after FENG et al., 1994)

REE 的吸附量在风化壳的碱性阶段比酸性阶段大大增加(刘英俊等, 1984), 有利于古风化淋积型稀土(铁、钽)多金属矿床的形成。

古风化淋积: 宣威—罗平一带, 玄武岩浆有两次大的喷发旋回(P₂β^a、P₂β^b), 早期旋回的玄武岩(P₂β^a)经过长期的古风化淋滤后, 它的主要矿物(如橄榄石、辉石和斜长石等)在氧化带发生氧化、分解, 硅、钙、镁、钠等组分大量淋失(表 2), 被地下水带走, 低价铁被氧化, 转化为高价铁的氢氧化物和氧化物(纤铁矿、针铁矿和含水的赤铁矿等)残留、沉积于地表。经风化作用解离出来的稀土元素、钽矿物被铁质、粘土矿物吸附并富集于玄武土、铁质粘

土岩和杂色粘土岩中。最终,形成具有面型分布特征的、古风化淋积型的稀土(铁、钛)多金属矿下含矿层(II)。下含矿层形成后,玄武岩浆又第二次大喷发,喷发结束后,玄武岩经过较长时间的古风化淋滤,其中的易溶组分淋失,稀土、铁、钛富集,在玄武岩顶部与宣威组底部的过渡带中形成古风化淋积-沉积型的稀土(铁、钛)多金属矿上含矿层(I)(图3)。

2.3 古地理环境

晚二叠世时期,宣威—罗平一带属地形起伏不大、离古陆不远的陆相氧化淋积环境为主——局部海陆交互相沉积环境,古地形总体表现为西高东低。其西侧昆明、曲靖一带为古陆(为滇中、牛首山古隆起),长期遭受剥蚀,往东至贵州水城、织金一带,海水逐渐变深为海湾-浅海相,稀土、铁、钛成矿物质迁移距离远,易分散或不易富集。处于古陆与浅海之间的宣威—罗平一带,其既是玄武岩古风化淋滤的场所,又是稀土、铁、钛成矿物质原地或半原地淀积的地带,是形成这一地区玄武岩古风化淋积型稀土、铁、钛多金属矿的有利古地理环境(图4)。

3 找矿前景

由于这一地区新发现的稀土、铁、钛多金属矿体赋存于晚二叠世玄武岩喷发旋回之间的古风化壳及玄武岩顶部与宣威组底部之间的古风化淋积层中,具有面型分布、厚度大及多矿同层或多元同体的特点,因此,具有重要的找矿意义和综合利用价值。

在云南宣威、富源、罗平一带及毗邻的滇东北地区,面积数千平方千米范围内,晚二叠世玄武岩呈带状大面积分布,在玄武岩带内发育有许多向斜盆地,这些向斜盆地被宣威组或三叠系地层覆盖,玄武岩古风化壳或古淋积层保存完整,按“源—转—储”的成矿机理或成矿模式,有较好成矿地质条件,找寻古风化淋积-沉积型的稀土、铁、钛多金属矿的潜力或空间较大,通过进一步工作有可能发现一个或多个大中型稀土、铁、钛成矿远景区域。

致谢:在成文过程中得到了云南省有色地质局李光斗副局长、崔银亮副局长及局其他领导、专家的指导、帮助,工作过程中得到了曲靖市政府、宣威市政府及其他单位的大力支持,云南省有色地质局地质研究所李昊工程师帮助制作完成了文中插图。在此深表谢意!

参考文献:

邓晋福, 罗照华, 苏尚国. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿

作用[M]. 北京: 地质出版社.

冯增昭, 金振奎, 杨玉卿, 鲍志东, 辛文杰. 1994. 滇黔桂地区二叠纪岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社.

胡瑞忠, 陶琰, 钟宏, 黄智龙, 张正伟. 2005. 地幔柱成矿系统: 以峨眉山地幔柱为例[J]. 地学前缘, 12(1): 42-54.

姜寒冰, 姜常义, 钱壮志, 朱士飞, 张蓬勃, 唐冬梅. 2009. 云南峨眉山高钛和低钛玄武岩的成因[J]. 岩石学报, 25(5): 1117-1134.

刘成英, 朱日详, 潘永信. 2011. 云南峨眉山玄武岩的古地磁研究[J]. 中国地球物理: 164.

刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社: 194-215.

潘杏南, 赵济湘, 张选阳. 1987. 康滇构造与裂谷作用[M]. 重庆: 重庆出版社: 2-98.

王崇云. 1986. 地球化学找矿基础[M]. 北京: 地质出版社: 9-18.

肖荣吾. 1988. 康滇大陆裂谷带特征及其演化[J]. 昆明: 云南地质, 7(3): 229-243.

徐义刚, 钟孙霖. 2001. 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, 30(1): 1-9.

杨平, 江洪飞, 马亚雄, 汪永华, 白磊. 2011. 云南省宣威—罗平铁矿勘查选区综合研究报告[R]. 昆明: 云南省有色地质局地质研究所.

杨平, 江洪飞, 马亚雄, 汪永华, 白磊. 2012. 云南省曲靖地区稀土多金属矿整装勘查实施方案[R]. 昆明: 云南省有色地质局地质研究所.

云南省地矿局第二区域地质调查队. 1977. 1:20 万区域地质调查报告—罗平幅(地质部分)[R]. 文山: 云南省地矿局第二区域地质调查队.

References:

Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province Second Regional Geological Survey Team. 1977. 1:200000 regional geological survey of Luoping(Geological section)[R]. Wenshan: Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province Second Regional Geological Survey Team: 1-74(in Chinese).

DENG Jin-fu, LUO Zhao-hua, SU Shang-guo. 2004. Lithogenesis, Tectonic setting and Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

FENG Zeng-zhao, JIN Zhen-kui, YANG Yu-qing, BAO Zhi-dong, XIN Wen-jie. 1994. Permian Lithofacies Paleogeography in Yunnan-Guizhou-Guangxi Region[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

HU Rui-zhong, TAO Yan, ZHONG Hong, HUANG Zhi-long, ZHANG Zheng-wei. 2005. Mineralization systems of a mantle plume: A case study from the Emeishan igneous province, southwest China[J]. Earth Science Frontiers, 12(1): 42-54(in

- Chinese with English abstract).
- JIANG Han-bing, JIANG Chang-yi, QIAN Zhuang-zhi, ZHU Shi-fei, ZHANG Peng-bo, TANG Dong-mei. 2009. Petrogenesis of high-Ti and low-Ti basalts in Emeishan, Yunnan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1117-1134(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-ying, ZHU Ri-xiang, PAN Yong-xin. 2011. Paleomagnetic investigations on the Emeishan basalts in Yunnan Province[J]. *Chinese Geophysics*, 164(in Chinese).
- LIU Ying-jun, CAO Li-ming, LI Zhao-lin. 1984. Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press: 194-215(in Chinese).
- PAN Xing-nan, ZHAO Ji-xiang, ZHANG Xuan-yang. 1987. Tectonics and Rifting in Kangdian Region[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House: 2-98(in Chinese).
- WANG Chong-yun. 1986. Geochemical prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- XIAO Rong-wu. 1988. Characteristics and Evolution of Kangdian Continental Rift Belt[J]. *Kunming: Yunnan Geology*, 7(3): 229-243(in Chinese).
- XU Yi-gang, ZHONG Sun-lin. 2001. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions[J]. *Geochimica*, 30(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- YANG Ping, JIANG Hong-fei, MA Ya-xiong, WANG Yong-hua, BAI Lei. 2011. A Comprehensive Research Report of Iron ore exploration constituency in Xunwei-Luoping, Yunnan province[R]. Kunming: Institute of Geology, Yunnan Nonferrous Metals Geological Bureau(in Chinese).
- YANG Ping, JIANG Hong-fei, MA Ya-xiong, WANG Yong-hua, BAI Lei. 2012. The Rare earth metals implementation scheme of Qujing, Yunnan[R]. Kunming: Institute of Geology, Yunnan Nonferrous Metals Geological Bureau(in Chinese).