

赣南新元古代变质岩稀土矿物及其地球化学特征*

王臻¹, 陈振宇^{1*}, 赵芝¹, 陈斌峰², 邹新勇²

(1 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2 江西地勘局赣南地质调查大队, 江西 赣州 341000)

摘要 近年来赣南地区首次报道了变质岩离子吸附型稀土矿床的发现, 为离子吸附型稀土的找矿提供了新思路。赣南地区新元古代变质岩大面积分布, 风化壳也广泛发育。文章对 30 件稀土元素含量 ($>300 \times 10^{-6}$) 高的变质岩矿物样品进行了详细的电子探针分析, 旨在查明赣南新元古代不同类型变质岩中的稀土矿物种类及特征, 探讨其成因、对全岩稀土元素含量的贡献以及离子吸附型稀土元素的成矿潜力。研究表明, 区域上变质岩可大致分为 6 类, 分别是变质凝灰岩类、板岩类、千枚岩类、片岩类、变砂岩类和变粒岩类, 不同类型变质岩的稀土矿物组合不同, 除了普遍存在的、难风化的独居石、磷钇矿和锆石外, 部分岩性中出现易风化的褐帘石、含稀土元素绿泥石和含稀土元素金红石, 及表生的水磷酸盐和磷铝酸盐等矿物。这些富稀土矿物贡献了全岩中大部分稀土元素, 且部分矿物成因与后期流体作用相关, 为成矿提供了良好的条件。文章总结分析认为, 赣南地区广泛分布的变质岩中, 片岩类、变砂岩类和变质凝灰岩类均具有相对易风化的稀土矿物组合, 尤其变质凝灰岩类和变砂岩类, 能为离子吸附型稀土成矿提供充足的物质来源, 具有可观的离子吸附型稀土成矿潜力。

关键词 地球化学; 离子吸附型稀土矿; 稀土元素; 稀土矿物; 变质岩; 赣南

中图分类号: P588.3

文献标志码: A

REE mineral and geochemical characteristics of Neoproterozoic metamorphic rocks in South Jiangxi Province

WANG Zhen¹, CHEN ZhenYu¹, ZHAO Zhi¹, CHEN BinFeng² and ZOU XinYong²

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Geological Survey Party of Gannan, Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract

In recent years, the discovery of ion-adsorption rare earth deposits in the regolith of metamorphic rocks has been reported for the first time in southern Jiangxi Province, which provides a new idea for ion-adsorption rare earth prospecting. Neoproterozoic metamorphic rocks and the related weathered crusts are widely distributed in South Jiangxi Province. In order to ascertain the species, genesis, proportion of REE contribution to the whole rock REE content as well as the potential of forming ion-adsorption REE deposits of the REE minerals, the authors conducted detailed electron microprobe analysis on 30 pieces of high REE content rock samples. The results show that mainly 6 types of metamorphic rocks are distributed in the study area, i.e., metamorphic tuff, slate, phyllite, schist, blastosammite, and granulite. REE minerals in these different types of rocks vary in composi-

* 本文得到中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金“赣南变质岩离子吸附型稀土矿成矿规律与找矿方向研究”(编号: YY-WF201527)和“赣南变质岩离子吸附型稀土矿成矿机理研究”(编号: K1506)项目联合资助

第一作者简介 王臻, 女, 1993 年生, 博士研究生, 研究方向为成因矿物学与找矿矿物学。Email: lopupve@qq.com

** 通讯作者 陈振宇, 男, 1978 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事矿物学和微束分析研究。Email: czy7803@126.com

收稿日期 2019-05-24; 改回日期 2019-06-13。赵海杰编辑。

tion; in addition to ubiquitous minerals such as monazite, xenotime and zircon, easily weathering minerals like albanite, REE chlorite, REE rutile and supergene minerals rhabdophane-(La) and florencite-(La) were also observed in some rock samples. Contributing most of the whole rock REE content, the REE minerals, some of which might be formed or altered by later fluid, are providing a favorable precondition for REE mineralization. To sum up, metamorphic tuff and blastopsammitite in the study area both have easily weathered REE mineral assemblages, making them the most potential substances supplier for the ion-adsorption REE accumulation, and indicating that metamorphic rocks in South Jiangxi Province have the potential to develop ion-adsorption REE mineralization.

Key words: geochemistry, ion-adsorption REE deposits, rare earth elements, REE minerals, metamorphic rocks, South Jiangxi Province

20世纪60年代末,首个离子吸附型稀土矿床(龙南富钇重稀土离子吸附型稀土矿)发现于中国赣南地区,而后,华南地区相继确定了一批离子吸附型稀土矿,使之成为世界瞩目的稀土元素资源地,赣南则因广泛分布着上百个离子吸附型稀土矿矿点,成为中国离子吸附型稀土矿床的重要矿集区(袁忠信等,2012)。传统观点认为,离子吸附型稀土矿床成矿母岩以花岗岩为主(杨岳清等,1981;阮道源等,1985;霍明远,1992),随着矿床发现和研究的深入,逐渐对浅成斑岩-次火山相的花岗质岩石乃至火山岩(宋云华等,1982;张祖海,1990)以及煌斑岩等也可能在有利条件下形成离子吸附型稀土矿床有了认识(Bao et al.,2008);2015年,中国首次报道浅变质岩母岩型离子型稀土矿——江西宁都GTZ富钨轻稀土离子吸附型稀土矿,矿体赋存于南华系浅变质岩风化壳中。GTZ矿床的发现增添了成矿母岩的类型、丰富了离子吸附型稀土成矿理论,为中国乃至世界同类型矿床的寻找提供了有益启迪(王登红等,2017;赵芝等,2017;2018;王臻等,2018)。

赣南地区变质岩分布广泛,岩石类型丰富,已有的研究表明该区变质岩可能具有离子吸附型稀土成矿潜力(王臻等,2018),尤其赣中南区域分布的青白口纪—南华纪变质沉凝灰岩和变质凝灰岩风化壳具有较好的稀土成矿前景(赵芝等,2018)。目前,变质岩离子吸附型稀土矿床的研究程度仍较低,也缺乏稀土矿物的研究。本文将通过对赣南地区变质岩中稀土矿物的研究,揭示赣南地区不同类型变质岩中的稀土矿物组合和地球化学特征,探讨稀土矿物成因和离子相稀土元素的物源,分析赣南地区变质岩离子吸附型稀土成矿潜力,并为该类型离子吸附型稀土矿床的成矿预测和找矿提供参考。

1 区域地质概况

赣南位于华夏地块中部,南岭东西向成矿带与武夷山北北东向成矿带交汇复合部位,经历了加里东期、海西—印支期和燕山期等多期构造运动,显示在东西向前寒武纪结晶基底断裂构造基础上叠加北东向断裂构造的复杂多样的构造形迹,其北部以江山-绍兴断裂带与扬子地块相隔,南以政和-大埔断裂带和东南沿海晚中生代火山岩带为界(舒良树等,2006;舒良树,2012)。区内燕山期岩浆侵入活动较为强烈,岩体出露较多,岩性以酸性花岗岩类为主,稀土矿床多产于大基岩边部的舌状突出部位或复式岩体的补充侵入岩体风化壳中,具有成群成片分布的特征。频繁的岩浆活动为离子吸附型稀土矿床等众多矿产资源的形成创造了良好的成矿母岩条件,而构造-岩浆活动通过对地形地貌的影响而控制着赣南稀土矿床的分布(赵芝等,2014)。

区内发育一套元古代中深变质岩结晶基底,之上沉积一套古生界盖层。基底变质岩形成年龄可能为新元古代,主要为中-新元古代变粒岩、片麻岩类,出露较为局限,仅少量分布于赣南南部;而寒武纪—新元古代浅变质岩在区内大面积分布,由古到新依次为神山组(Qb_{3s})、库里组(Qb_{3k})、上施组(Nh_{1s})、沙坝黄组(Nh_{2-3s})、洪山组(Nh/Zh)、坝里组(Z_{1b})、下坊组(Z_{1x})和老虎塘组(Z_{2l}),牛角河组(Z_{1-2n})、高滩组(Z_{3g})和水石组(Z_{3sh}),除集中分布于赣南东北部外,其余地区多被中生代花岗岩穿插分割或被中生代之后的沉积岩覆盖(图1)。

区内以侵蚀剥蚀地貌为主,有利于岩石风化的温暖潮湿的气候条件,不仅变质岩广泛分布,且变质岩尤其是浅变质岩风化壳广泛发育。GTZ变质岩

离子吸附型稀土矿床即赋存于浅变质岩系中,成矿岩体全风化层厚度5~30 m,多为8~10 m,其全部或中、上部为矿体。近年来,项目组在GTZ矿床外圈的浅变质岩系中也发现了稀土矿体。

2 样品采集和分析方法

变质岩样品主要采集于兴国-宁都-寻乌地区和

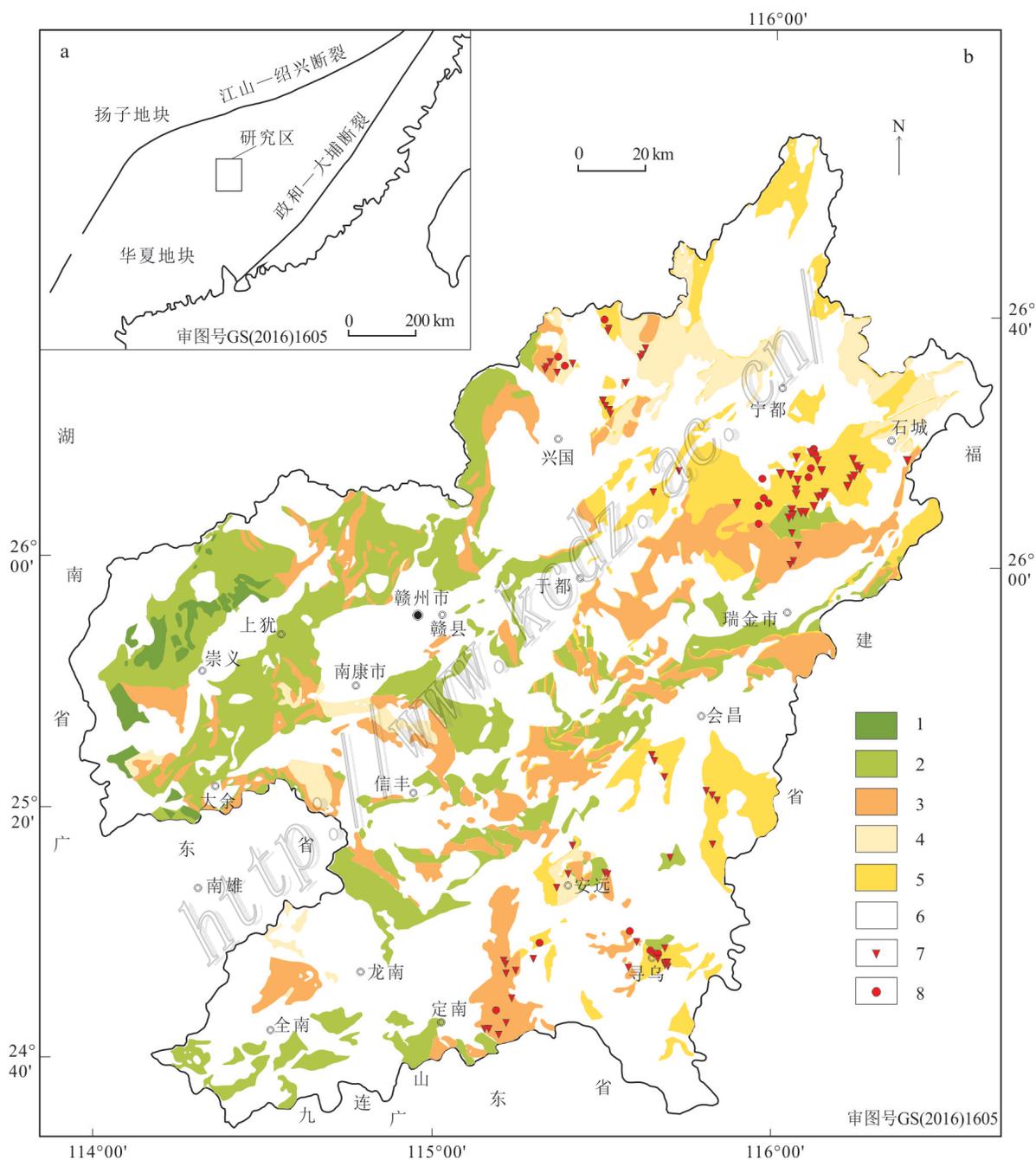


图1 华南区域构造简图(a)和赣南变质岩分布特征示意图(b)

1—奥陶系板岩;2—寒武系变质砂岩、变质凝灰岩等;3—震旦系变质砂岩、板岩等;4—南华系变质砂岩、千枚岩等;5—青白口系变质砂岩、变质凝灰岩等;6—其他岩石类型分布区;7—采样点;8—分析点

Fig. 1 Sketch tectonic map of South China (a) and distribution of metamorphic rocks in South Jiangxi Province (b)
1—Ordovician slate; 2—Cambrian blastosammite, metamorphic tuff, etc.; 3—Sinian blastosammite, slate, etc.; 4—Nanhua blastosammite, phyllite, etc.; 5—Qingbaikou blastosammite, metamorphic tuff, etc.; 6—Distribution area of other rock types; 7—Sampling spots; 8—Analytical spots

会昌-安远-寻乌地区,共计121件。本文选择了30件不同类型变质岩稀土元素含量高的样品(全岩化学分析 $\Sigma\text{REE}>300\times 10^{-6}$),对其中稀土矿物进行详细的电子探针分析。不同类型变质岩的造岩矿物和稀土矿物组合见表1。

变质岩样品中矿物的电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,采用JXA-8230电子探针和X-max能谱仪,测试条件为加速电压15 kV,激发电流20 nA,电子束直径为5 μm ,极小的REE矿物使用聚焦电子束。稀土矿物标样采用人造稀土五磷酸盐,如五磷酸镧、五磷酸铈等。

3 稀土矿物

变质岩样品的岩石类型及矿物组成为:① 6种岩石类型:板岩类、千枚岩类、片岩类、变质砂岩类、变质凝灰岩类和变粒岩类;② 稀土矿物有稀土磷酸盐类,如独居石、磷钇矿、磷铝酸盐类和水磷酸盐类矿物;稀土硅酸盐类,如褐帘石和含稀土绿泥石;稀土氧化物类,如含稀土钽石、含稀土金红石、锆石和方钇石。不同类型稀土矿物的代表性电子探针分析结果见表2。

3.1 稀土磷酸盐类

独居石:属轻稀土元素富集型矿物,广泛分布于各类变质岩中。独居石颗粒粒径变化较大,从极细小颗粒至 $>100\ \mu\text{m}$ 颗粒均可见,多数约20 μm ,显微镜下难以辨认。背散射图像(BSE)研究显示,变质岩中的独居石常成群分布或沿粒间裂隙呈浸染状分

布于某一矿物颗粒上(通常为绿泥石或黑云母)(图2h),也可呈较自形的椭圆状或不规则状、或呈扁平状独立分布,少见环带结构(图2a)。独居石本次共获得146个测试点数据,见表2,以 TR_2O_3 代表稀土元素总量。其 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 介于40.6%~71.8%,均值62.8%,其中 $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 平均值为12.8%, $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 平均值为30.1%, $w(\text{Pr}_2\text{O}_3)$ 平均值为3.52%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_3)$ 平均值为10.6%; $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 平均值为29.7%。大部分样品中独居石Y、Ca、U元素含量均较低,Th含量较高(部分千枚岩样品中的独居石中 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 可达20.3%),且常含有Fe、Al、Si等元素。不同岩性变质岩产出的独居石,其球粒陨石标准化的REE配分曲线具有一些相似性(如图3a~c)。部分样品表现Sm元素的负异常、部分样品呈Pr元素的正异常,板岩类(图3a)、千枚岩类(图3c)、片岩类(图3e)和变粒岩类(图3f)均具有Ho元素的正异常和Er元素的负异常,变质凝灰岩类(图3d)则显示Ho元素的负异常和Er元素的正异常。

磷钇矿:属重稀土元素富集型矿物,广泛分布于各类变质岩中,含量较独居石更低,常分布于矿物粒间裂隙,也可与金红石、独居石等矿物共生(图2g)。呈较自形的椭圆状或不规则粒状,颗粒一般较为细小(图2b),粒径多介于1~10 μm 之间。本次共获得35个测试点数据见表2。 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 介于58.2%~64.9%,均值61.5%,其中 $w(\text{LR}_2\text{O}_3)$ 均值为0.94%, $w(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 平均值为41.2%, $w(\text{Dy}_2\text{O}_3)$ 平均值为5.74%, $w(\text{Ho}_2\text{O}_3)$ 平均值为2.34%, $w(\text{Er}_2\text{O}_3)$ 平均值为3.12%, $w(\text{Yb}_2\text{O}_3)$ 平均值为4.18%, $w(\text{Lu}_2\text{O}_3)$ 平均值为1.69%;

表1 赣南变质岩样品特征简表

Table 1 Characteristics of metamorphic rock samples of South Jiangxi Province

岩性	采集层位	造岩矿物及含量	稀土矿物组合
板岩类	Qbk ¹ 、Qb ₃ ^{1b} s、Z ₂ l	(石英+长石类):70%~90%	独居石+磷钇矿+锆石+含稀土钛铁矿+含稀土金红石
千枚岩类	Qbsh ¹ 、Qbsh ² 、Nh _{2,3} s ⁵ 、Qb ₃ shn ² 、 $\epsilon_{1,2}$ n	绢云母:10%~60%,石英:5%~40%,白云母:5%~20%,黑云母:5%~15%,绿泥石:0~10%	独居石+磷钇矿+锆石+含稀土钛铁矿
片岩类	Qbk ² 、Qb ₃ X、Z ₁ sh ³ 、Z ₁ sh ¹ 、Z ₁ g	石英:10%~50%,绢云母:10%~30%,白云母:5%~20%,黑云母:5%~10%	独居石+磷钇矿+锆石+含稀土钛铁矿+磷铝酸盐类+褐帘石
变砂岩类	Nh ₁ s、Nh _{2,3} s ⁵ 、Z ₁ b、Z ₁ d、Z ₂ l、Nh ₁ s、Qb ₃ X、Z ₁ x ² 、Z ₁ sh ²	石英:30%~65%,长石类:5%~30%,黑云母:3%~9%,白云母:3%~12%	独居石+磷钇矿+锆石+磷铝酸盐+水磷酸盐+褐帘石
变质凝灰岩类	Qb、 $\epsilon_{1,2}$ n、Z ₁ b	石英:10%~30%,隐晶质黏土、火山灰等:70%~90%	独居石+磷钇矿+锆石+含稀土金红石+含稀土绿泥石+含稀土钽石+方钇石
变粒岩类	Qb ₂ tx、Z ₁ x ¹	长石类:30%~60%,石英:20%~40%,黑云母:5%~30%,白云母:5%~15%	独居石+磷钇矿+锆石+含稀土绿泥石

表2 赣南变质岩代表性稀土矿物及含稀土矿物电子探针成分

Table 2 Representative electron-microprobe analyses of REE minerals and REE-bearing minerals of the metamorphic rocks from South Jiangxi Province

组分	独居石	磷钇矿	含稀土褐帘石	含稀土绿泥石	含稀土金红石	含稀土钛铁矿	方钨石	含稀土钽石	水磷酸盐	磷铝酸盐
w(B)/%										
Al ₂ O ₃	0~7.88	0~1.75	15.5~23.7	5.97~21.3	4.14~7.92	0~1.39	1.17, 3.48	6.46	0.087~3.56	1.96~34.9
SiO ₂	0.35~8.35	0~3.40	33.7~38.0	22.4~36.5	5.42~9.80	0~2.32	3.50, 4.26	19.3	0.283~4.88	0.249~6.72
K ₂ O	0~1.22	0~0.589	0~1.11	0~2.44	0.112~0.211	0.007~0.197	0.028, 0.114	1.30	0.026~0.390	0.068~0.604
P ₂ O ₅	22.3~34.3	24.9~37.9	0~0.174	0~1.62	0.136~11.1	0~0.01	1.21, 1.63	5.01	18.7~31.8	19.4~29.1
CaO	0~3.03	0~0.473	10.3~14.0	0.674~1.27	0.095~0.672	0	0.322, 0.498	1.59	0.432~2.38	0.31~2.27
TiO ₂	0~17.4	0~1.67	0~2.546	0~1.71	40.1~50.2	46.2~58.0	2.44, 5.29	0.11	0~1.04	0~0.244
FeO	0~12.4	0.039~8.67	10.5~13.6	21.4~34.5	6.42~16.5	22.2~50.9	3.68, 14.8	3.08	0.092~22.6	0.436~9.07
ThO ₂	0~20.3	0~4.75	0~0.595	0~1.93	6.42~16.5	0~0.440	1.31, 2.01	47.5	0~0.864	0~0.647
Y ₂ O ₃	0~3.98	27.6~49.9	0.003~0.13	0.058~0.177	2.36~14.7	0~0.046	0.105, 0.116	2.49	1.92~16.4	0.079~5.19
La ₂ O ₃	7.76~18.5	0~5.84	2.64~5.34	0.04~5.34	0	0	0.061, 0.193	0	6.98~13.00	3.79~11.7
Ce ₂ O ₃	8.74~36.4	0~10.5	5.44~10.6	0.02~8.03	0~1.09	0~0.464	58.3, 62.1	0.72	0.064~0.75	0~2.87
Pr ₂ O ₃	1.37~6.65	0~1.61	0.926~1.73	0.024~0.709	0.070~0.262	0~0.034	0.071, 0.165	0.32	2.92~5.82	1.01~4.60
Nb ₂ O ₃	5.11~19.6	0~2.36	1.31~3.55	0~2.83	0~0.716	0~0.230	0.559, 0.776	0.32	9.44~21.4	1.71~20.1
Sm ₂ O ₃	0~4.27	0.155~1.17	0.236~0.580	0~0.223	0.015~0.717	0~0.254	0.476, 0.480	0.52	1.47~5.76	0.19~3.11
Eu ₂ O ₃	0~1.89	0	0	0~0.062	0~0.041	0~0.214	0	0.06	0~0.373	0~0.668
Gd ₂ O ₃	0~6.62	0.389~3.66	0.633~1.46	0~1.03	0.178~0.400	0~0.081	2.80, 3.38	0.17	2.48~4.36	0.15~4.20
Tb ₂ O ₃	0~1.08	0~1.03	0	0	0	0~0.104	0	0.02	0	0
Dy ₂ O ₃	0~1.51	0~8.69	0.144~0.256	0.096~1.28	1.24~2.45	0.752~2.72	0.194, 0.229	1.31	1.98~3.76	0~3.41
Ho ₂ O ₃	0~1.28	0.68~6.51	0~0.560	0	0.311~0.659	0	0	0.04	1.00~2.15	0~2.02
Er ₂ O ₃	0~5.81	1.49~6.00	0~0.161	0.112~0.241	0.053~0.160	0.060~0.390	0.066, 0.131	0.19	0.046~0.911	0~0.144
Tm ₂ O ₃	0~0.35	0~0.743	0~0.029	0	0.351~0.507	0~0.006	0	0	0~0.329	0~0.237
Yb ₂ O ₃	0~0.15	0.51~9.50	0	0	0~0.399	0	0	0.07	0~0.546	0~0.068
Lu ₂ O ₃	0~0.65	0.234~2.50	0~0.045	0.05	0.053~0.133	0~0.079	0, 0.015	0.23	0.246~0.865	0~0.156
TR ₂ O ₃	40.6~71.8	58.2~64.9	12.0~21.4	1.69~18.5	8.00~19.3	1.31~3.31	62.7, 67.6	6.46	31.6~61.4	12.9~49.0
总和	95.6~101	94.0~103	96.1~101	86.3~89.2	95.7~97.8	92.2~100	86.5, 92.7	90.9	68.2~85.7	79.5~101

$w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 平均值为34.4%,其余杂质元素含量均很低。不同类型变质岩产出的磷钇矿,其球粒陨石标准化的REE配分曲线具有相似性(图4a),均显示Ce、Nb和Tm元素的负异常, Lu元素正异常。

水磷酸盐类矿物:属轻稀土元素富集型矿物。仅发现于变质石英粉砂岩样品中。其元素含量特征可类比寻乌产水磷钨矿(张培善等,1998),区别在于本次研究中所发现矿物具有强烈的Ce亏损,不可归于水磷铈矿类,目前未准确定名。它们常呈交代蚀变状分布于黑云母、白云母等矿物中,并常与磷铝酸盐类矿物共生(图2d),粒径约10~50 μm 。本次共获得13个测试点,数据见表2。从表2可见,其 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 介于31.6%~61.4%,均值50.6%,其中 $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 为6.98%~13.00%,平均值10.12%, $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 范围在0.064%~0.75%,平均值为0.403%, $w(\text{Pr}_2\text{O}_3)$ 变

化于2.92%~5.82%之间,平均值4.77%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_3)$ 范围为9.44%~21.4%,平均值16.4%, $w(\text{Sm}_2\text{O}_3)$ 范围在1.47%~5.76%,平均值2.95%, $w(\text{Gd}_2\text{O}_3)$ 为2.48%~4.36%,平均值3.33%, $w(\text{Dy}_2\text{O}_3)$ 范围在1.98%~3.76%,平均值2.87%, $w(\text{Ho}_2\text{O}_3)$ 范围在1.00%~2.15%之间,平均值1.66%, $w(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 介于1.92%~16.4%,平均值6.45%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为0.087%~3.56%,平均值1.41%, $w(\text{SiO}_2)$ 介于0.283%~4.88%,平均值1.85%, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 范围在18.7%~31.8%,平均值27.0%, $w(\text{CaO})$ 范围在0.432%~2.38%,平均值1.21%, $w(\text{FeO})$ 范围在0.092%~22.6%,均值为4.51%。水磷酸盐类矿物的球粒陨石标准化REE配分曲线显示强烈的Ce元素负异常和Lu元素的正异常,此外,除2件样品具有Tm元素负异常外,其余样品均具有Tm元素正异常和Er、Yb元素的负异常(图4b)。

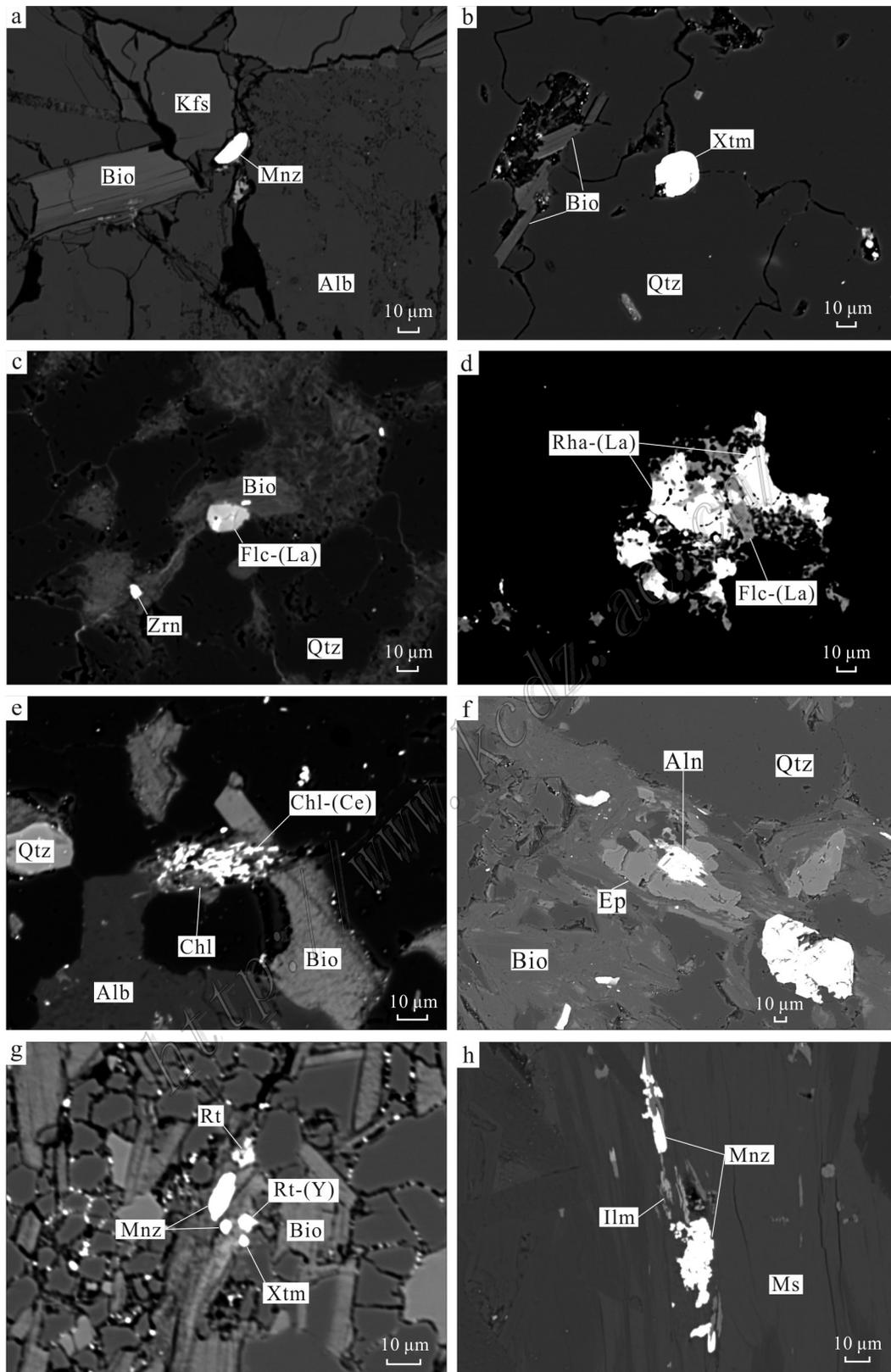


图2 不同岩石类型中稀土矿物的背散射图像

- a. 较自形的独居石产于钠长石和钾长石颗粒接触边界; b. 细小磷钇矿颗粒分布于石英中; c. 磷钼酸盐类矿物分布于黑云母矿物颗粒中;
d. 水磷酸盐类矿物和磷钼酸盐类矿物共生; e. 绿泥石可能由于后期热液蚀变而富含稀土; f. 褐帘石分布在绿帘石颗粒内;

g. 含稀土金红石和独居石、磷钇矿共生; h. 独居石沿白云母矿物颗粒间裂隙分布

Alb—钠长石; Bio—黑云母; Cer—铈铈矿; Chl—绿泥石; Chl-(Ce)—含稀土绿泥石; Ep—绿帘石; Flc-(La)—稀土磷钨酸盐; Ilm—含稀土钛铁矿; Ms—白云母; Mnz—独居石; Qtz—石英; Rha-(La)—水磷钨矿; Rt—金红石; Rt-(Y)—含稀土金红石; Xtm—磷钇矿; Zrn—锆石

Fig. 2 BSE images of REE minerals of different types of metamorphic rocks

a. Monazite occurring at the contact edge of feldspar and potassium feldspar particles; b. Fine mineral particles of phosphorus and yttrium distributed in quartz; c. Grains of florencite-like mineral appearing in a biotite grain; d. Rhabdophane(La)-like mineral and florencite-like mineral deposited synchronously; e. Corroded grains of chlorite rich in REE; f. Allanite intergrows within the epidote; g. Rutile rich in REE deposited synchronously with monazite and yttrium; h. Monazite distributed along intergranular cracks of muscovite

Alb—Albite; Bio—Biotite; Cer—Cerite; Chl—Chlorite; Chl-(Ce)—Chlorite with cerium; Ep—Epidote; Flc-(La) florencite with lanthanum;

Ilm—Ilmenite with REE; Ms—Muscovite; Mnz—Monazite; Qtz—Quartz; Rha-(La)—Rhabdophane with lanthanum; Rt—Rutile;

Rt-(Y)—Rutile with yttrium; Xtm—Xenotime; Zrn—Zircon

磷钨酸盐类矿物: 属轻稀土元素富集型矿物。仅在变质石英粉砂岩和云母石英片岩中有发现。其元素含量特征可类比磷钨矿(张培善等, 1998), 区别在于本次研究中所发现矿物具有强烈的 Ce 亏损, 不可归于磷钨矿类, 目前未准确定名。它们常呈他形不规则粒状或蚀变状分布于黑云母、白云母等矿物上或粒间裂隙中(图 2c), 约 10~30 μm 。共获得 26 个测试点位(表 2), 由表 2 可见其 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 介于 12.9%~49.0%, 均值为 21.2%, 其中 $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 范围在 3.79%~11.7% 之间, 平均值 8.7%, $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 为 0~2.87%, 平均值 1.05%, $w(\text{Pr}_2\text{O}_3)$ 范围在 1.01%~4.60% 之间, 平均值 2.33%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_3)$ 为 1.71%~20.1%, 平均值 5.37%, $w(\text{Sm}_2\text{O}_3)$ 介于 0.19%~3.11% 之间, 平均值 1.08%, $w(\text{Gd}_2\text{O}_3)$ 为 0.15%~4.20%, 平均值 0.79%, $w(\text{Dy}_2\text{O}_3)$ 范围在 0~3.41%, 平均值 0.51%, $w(\text{Ho}_2\text{O}_3)$ 为 0~2.02%, 平均值 0.28%, $w(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 范围在 0.079%~5.19%, 平均值 0.59%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 27.7%~34.9%, 平均值 28.5%, $w(\text{SiO}_2)$ 为 0.249%~6.72%, 平均值 1.01%, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为 19.4%~29.1%, 平均值 22.0%, $w(\text{CaO})$ 为 0.31%~2.27%, 平均值 1.00%, $w(\text{FeO})$ 范围在 0.436%~9.07%, 均值 4.05%。磷钨酸盐类矿物稀土配分特征与水磷酸盐类矿物具有相似性, 其球粒陨石标准化 REE 元素配分曲线显示 Ce、Er、Yb 元素负异常和 Ho、Tm、Lu 元素正异常(图 4c)。

3.2 稀土硅酸盐类

含稀土绿泥石: 属轻稀土元素富集型矿物, 是较少见的含稀土硅酸盐类矿物。仅在变质凝灰岩类和变粒岩类中有少量发现(图 2e)。本次共获得 4 个测试点数据(表 2), 由表 2 数据可见, $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 介于 1.69%~18.5%, 均值 12.3%, 其中 $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ = 0.04%~5.34%, 平均值 3.47%, $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ = 0.02%~8.03%, 平均值 5.31%,

$w(\text{Nb}_2\text{O}_3)$ = 0~2.83%, 平均值 1.79%, $w(\text{Gd}_2\text{O}_3)$ = 0~1.03%, 平均值 0.45%, $w(\text{Dy}_2\text{O}_3)$ = 0.096%~1.28%, 平均值 0.36%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 5.97%~21.3%, 平均值 11.1%, $w(\text{SiO}_2)$ = 22.4%~36.5%, 平均值 29.2%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 变化于 0~2.44% 之间, 均值为 1.27%, $w(\text{CaO})$ 介于 0.674%~1.27% 之间, 平均值为 1.03%, $w(\text{TiO}_2)$ = 0~1.71%, 均值为 0.35%, $w(\text{FeO})$ = 21.4%~34.5%, 均值为 29.3%, $w(\text{ThO}_2)$ = 0~1.93%, 均值为 1.20%。含稀土绿泥石的球粒陨石标准化 REE 元素配分曲线显示 Gd 元素正异常和 Sm 元素负异常(图 4d)。

褐帘石: 属轻稀土元素富集型矿物, 仅在变砂岩类和片岩类中有少量发现。常呈不规则状分布于其他矿物颗粒上或沿边缘和粒间裂隙分布, 粒径通常 <10 μm ; 亦见有呈半自形粒状与绿帘石共生者(图 2f), 粒径 10~40 μm 。本次共获得 10 个数据点(表 2), 从表 2 可见, 其 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 介于 12.0%~21.4%, 均值 18.4%, 稀土以铈为主, $w(\text{La}_2\text{O}_3)$ 为 2.64%~5.34%, 平均值 3.84%, $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 为 5.44%~10.6%, 平均值 8.33%, $w(\text{Pr}_2\text{O}_3)$ 为 0.93%~1.73%, 平均值 1.47%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_3)$ 为 1.31%~3.55%, 平均值 2.00%, $w(\text{Gd}_2\text{O}_3)$ 为 0.63%~1.46%, 平均值 1.18%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 15.5%~23.7%, 平均值 19.4%, $w(\text{SiO}_2)$ 为 33.7%~38.0%, 平均值 35.1%, $w(\text{CaO})$ 为 10.3%~14.0%, 平均值 12.2%, $w(\text{FeO})$ 为 10.5%~13.6%, 平均值 12.8%。片岩中的褐帘石, 其球粒陨石标准化的 REE 配分曲线显示 Pr、Gd 元素和 Lu 元素的正异常, Nb、Sm 元素的负异常, 变质砂岩中的褐帘石则显示 Pr、Gd 和 Ho 元素的正异常以及 Sm 元素的负异常(图 4e)。

3.3 稀土氧化物类

含稀土金红石: 属富钇的重稀土元素富集型矿物, 是较少见的含稀土氧化物类矿物。仅在变质凝灰岩和板岩类中有少量发现, 常呈粒状或不规则蚀

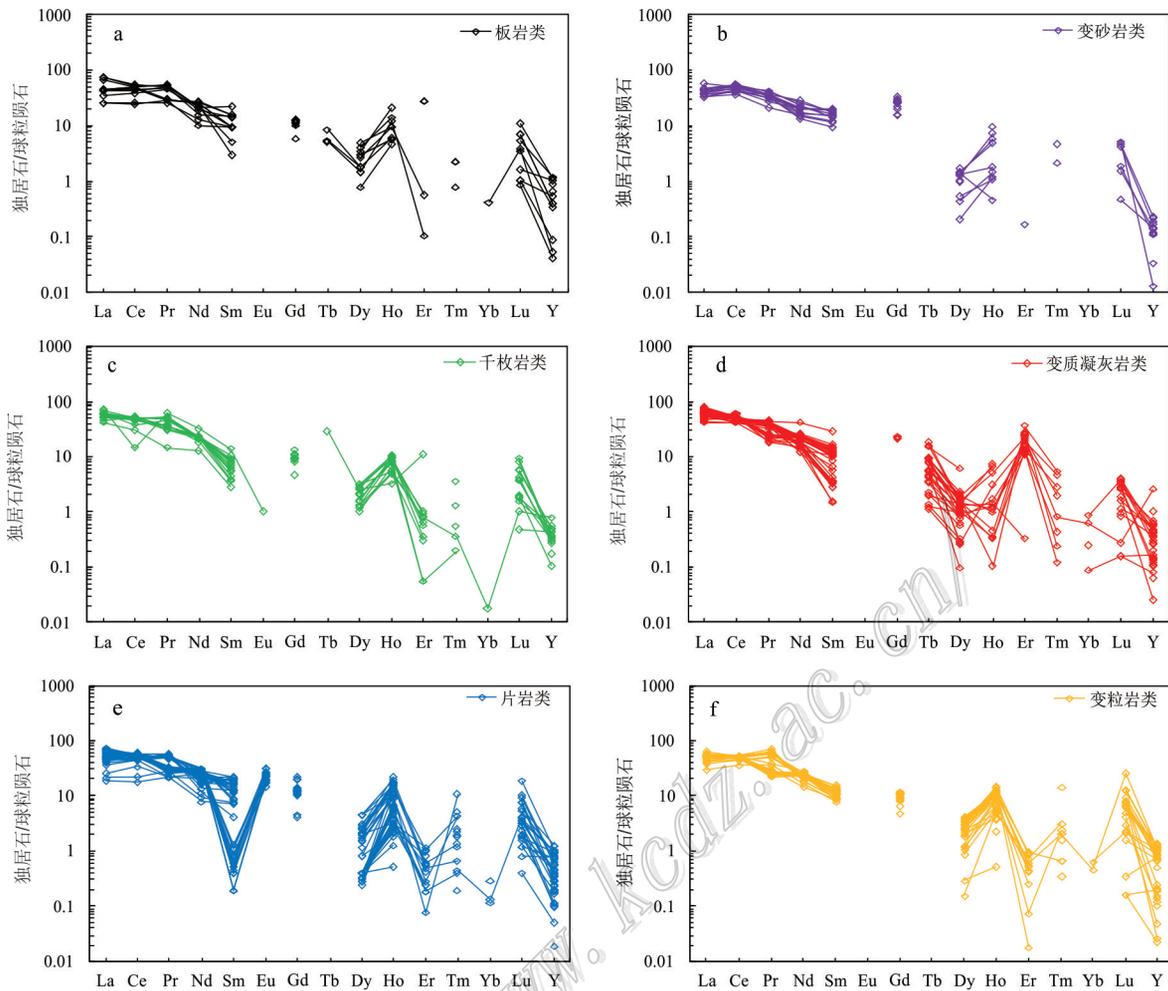


图3 不同岩石类型中独居石的球粒陨石标准化的REE配分曲线

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of minerals in monazite in different metamorphic rock types

变状与绿泥石和白云母共生(图2g),粒径约 $10\ \mu\text{m}$ 。本次共获得3个数据点,范围见表2。其 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 介于 $8.00\%\sim 19.3\%$ 之间,均值 13.3% ,其中 $w(\text{Y}_2\text{O}_3)=2.36\%\sim 14.73\%$,平均值 8.81% , $w(\text{Dy}_2\text{O}_3)=1.25\%\sim 2.45\%$,平均值 1.78% ; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=4.14\%\sim 7.92\%$,平均值 6.11% , $w(\text{SiO}_2)=5.42\%\sim 9.80\%$,平均值 8.05% , $w(\text{P}_2\text{O}_5)=0.136\%\sim 11.14\%$,平均值 6.42% , $w(\text{TiO}_2)=40.2\%\sim 50.2\%$,均值 45.8% , $w(\text{FeO})=6.42\%\sim 16.5\%$,均值 10.7% , $w(\text{ThO}_2)=0.190\%\sim 1.22\%$,均值 0.718% 。含稀土元素金红石的球粒陨石标准化REE配分曲线显示其具Dy和Lu元素的正异常(图4f)。

含稀土钛铁矿:含微量重稀土元素的氧化物类矿物,在板岩类、千枚岩类和片岩类中均有发现。其中,板岩类和千枚岩类中发现的含稀土钛铁矿呈半自形-自形粒状产于白云母、黑云母等矿物粒间

缝隙中,粒径大小不一,最大者达到 $100\ \mu\text{m}$;片岩中发现的则与独居石共生、产于白云母中(图2h),呈不规则状 $<10\ \mu\text{m}$ 。本次共获得8个测试点数据,范围见表2,从表中可见,其 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 介于 $1.31\%\sim 3.31\%$,均值 2.00% ,其中 $w(\text{Dy}_2\text{O}_3)=0.752\%\sim 2.72\%$,平均值 1.55% ; $w(\text{TiO}_2)=46.2\%\sim 58.0\%$,均值 49.6% , $w(\text{FeO})=22.2\%\sim 50.9\%$,均值 41.9% 。含稀土钛铁矿的球粒陨石标准化REE配分曲线(图4g)显示其具Dy元素的正异常。

锆石:常含一定量的稀土元素,在含稀土的锆石中,Zr元素可被稀土元素置换,使 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 大于 1% ,最高可达 20% (张培善等,1998)。本文所研究的变质岩样品中锆石分布广泛(含量 $2\%\sim 5\%$)、自形且粒度细小(粒径多为 $1\sim 30\ \mu\text{m}$),多以碎屑锆石为主。它们的稀土元素含量均低于能谱检出限(1%),故未进行电子探针分析。但由于其矿物数量多,对全岩

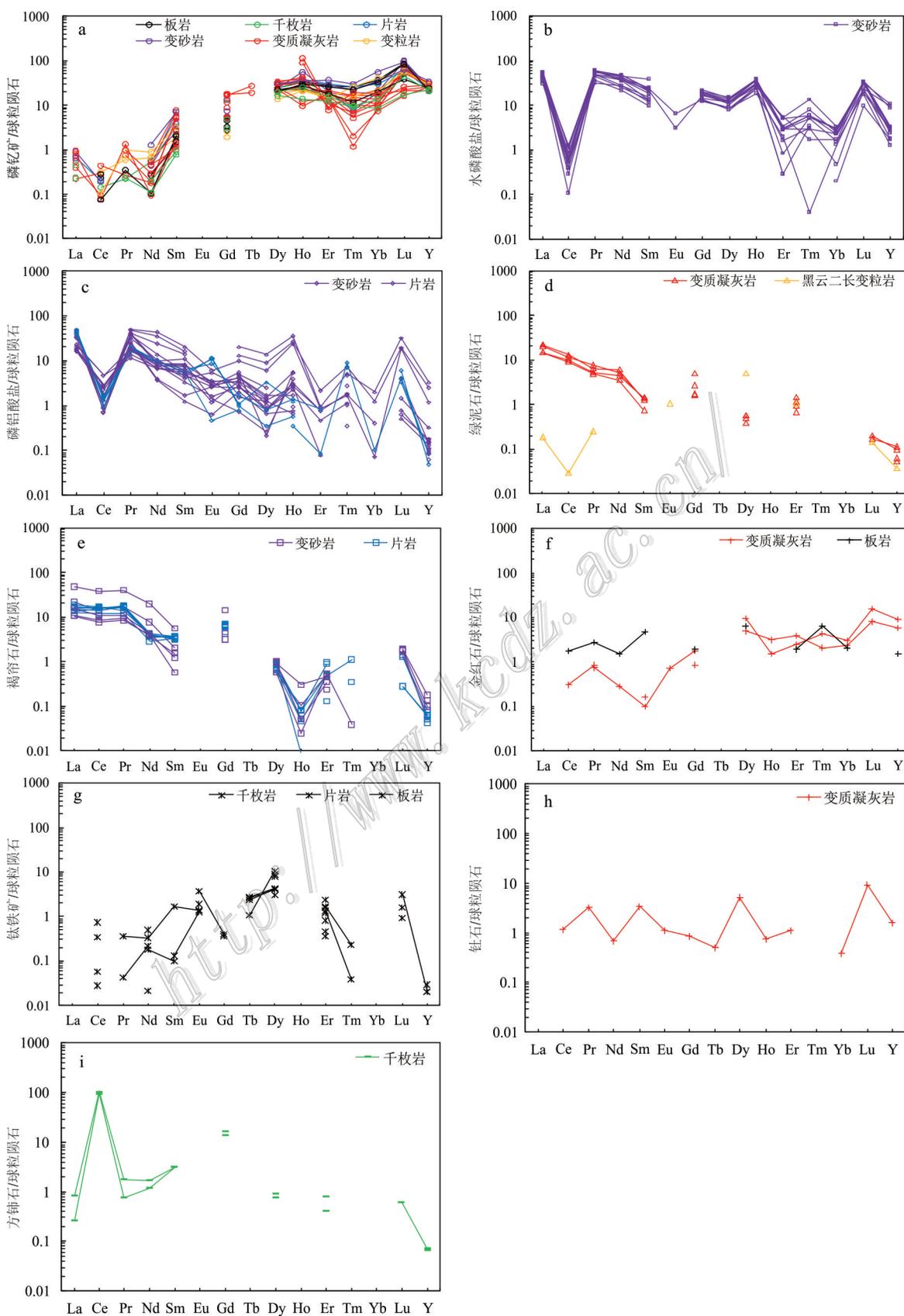


图 4 不同岩石类型中稀土矿物的球粒陨石标准化的 REE 配分曲线

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of REE minerals in different types of metamorphic rocks

稀土含量的贡献不可忽视,在计算时以矿物含量2%、稀土含量0.1%计。

含稀土钍石:属重稀土元素富集型矿物。仅在1件变质凝灰岩样品中发现1粒含稀土钍石,稀土元素配分曲线左倾(图4h),粒状,粒径为2 μm,产于石英和白云母矿物颗粒间接触带空隙中。 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 为 $w(\text{UO}_2)$ 为0.89%,6.47%,其中 $w(\text{Dy}_2\text{O}_3)$ 为1.31%, $w(\text{Y}_2\text{O}_3)$ 为2.49%, $w(\text{ThO}_2)$ 为47.5%, $w(\text{SiO}_2)$ 为19.3%, $w(\text{FeO})$ 为3.08%。

方钍石:属于简单氧化物类稀土矿物,主要富集的稀土元素为钍,本次仅发现于绢云千枚岩样品中,呈不规则粒状,粒径约10~30 μm,均产于石英矿物颗粒间裂隙中,成分不纯,混入杂质较多。稀土元素配分曲线Ce元素正异常明显(图4i)。本次共获得2个测试点数据,见表2,其 $w(\text{TR}_2\text{O}_3)$ 为62.7%和67.6%,其中 $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 为58.3%和62.1%, $w(\text{Gd}_2\text{O}_3)$ 为2.80%和3.38%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为1.17%和3.48%, $w(\text{SiO}_2)$ 为3.50%和4.26%, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为1.21%和1.63%, $w(\text{TiO}_2)$ 为2.44%和5.29%, $w(\text{FeO})$ 为3.68%和14.8%, $w(\text{ThO}_2)$ 为1.31%和2.01%。

4 讨论

4.1 稀土矿物组合及其成因

赣南地区变质岩可大致分为6种类型,分别具有不同稀土矿物组合:①变粒岩类:独居石+磷钇矿+含稀土绿泥石+锆石;②板岩类:独居石+磷钇矿+锆石+含稀土钛铁矿+含稀土金红石;③千枚岩类:独居石+磷钇矿+锆石+含稀土钛铁矿;④片岩类:独居石+磷钇矿+锆石+含稀土钛铁矿+磷铝酸盐类+褐帘石;⑤变砂岩类:独居石+磷钇矿+锆石+磷铝酸盐+水磷酸盐+褐帘石;⑥变质凝灰岩类:独居石+磷钇矿+锆石+含稀土金红石+含稀土绿泥石+含稀土钍石+方钍石。同种稀土矿物在不同类型变质岩中具有相似的元素含量特征,且稀土元素配分曲线相似(图3、4)。

不同类型变质岩中稀土矿物的类型主要有稀土磷酸盐、稀土硅酸盐和稀土氧化物三大类。流体的交代作用可以增加岩石中稀土元素的含量(Liu et al., 2017; 2019),更重要的是,使得稀土矿物更容易风化(赵芝等, 2017)。前人研究表明,成矿花岗岩类中稀土矿物主要为岩浆成因和交代成因,稀土元素的富集是岩浆作用和流体交代作用叠加的结果(Bern et al., 2017; 赵芝等, 2018)。稀土磷酸盐类矿

物的稀土元素含量最高,其中,独居石除个别孤立分布,较为自形(>100 μm)者可能为岩浆成因外,多数粒径约20 μm、形态不规则且Th、U含量低,往往见于副变质岩中(王臻等, 2018),其为热液、沉积成因或变质成因的可能性较大(Parrish, 1990; 洪文兴等, 2000; Schandl et al., 2004; 邱坤峰等, 2011; 王智琳等, 2015)。赣南地区岩浆活动频繁,释放出的流体有利于独居石结晶,此外,变质作用和火山作用释放的流体也可能影响独居石的沉淀。磷钇矿由于含量少、颗粒细小、形态不规则,难以判断其成因(刘志超等, 2011)。水磷酸盐类和磷铝酸盐类为典型的表生成因稀土矿物(张培善等, 1998)。稀土硅酸盐类矿物多见于变砂岩和变质凝灰岩中,研究可见褐帘石呈不规则核/包体产于绿帘石中,很可能是绿帘石蚀变的产物,而含稀土绿泥石也常呈不规则形态与绿泥石共生,很可能为绿泥石在流体交代作用下的蚀变产物。稀土氧化物矿物中,除锆石外,其余矿物在自然界并不多见。含稀土金红石和含稀土钛铁矿旁往往存在其他稀土矿物,如独居石和磷钇矿,据此推测含稀土金红石可能是后期流体作用下,稀土元素活化再沉淀的产物(丁静等, 2016)。这些稀土矿物的特征均暗示着除岩浆结晶作用外,还有流体交代等其他地质作用存在甚至主导着稀土矿物的形成和改造。对GTZ矿区稀土矿物的研究表明,浅变质岩与花岗岩和中酸性火山岩中稀土矿化特征具有相似性——对母岩最为有利的稀土矿化作用很可能为流体交代作用(赵芝等, 2018),故本文认为赣南地区变质岩中稀土矿物显示出的流体交代作用迹象明显,为后期的成矿作用提供了良好的前提条件。

4.2 稀土矿物对成矿的指示

对花岗岩母岩型离子吸附型稀土矿床的研究表明,当岩浆向中酸性、中性方向演化时,造岩矿物是决定岩石稀土元素特征的主要因素,而当岩浆向酸性方向演化时,稀土副矿物的影响则占主导地位(杨学明等, 1992)。赣南地区浅变质岩属中酸性-酸性岩,原岩多为沉积岩和火山凝灰岩(王臻等, 2018),造岩矿物和稀土副矿物对变质岩母岩中稀土元素含量、特征的影响仍未知。本文所采的变质岩样品,其造岩矿物含量往往高于90%,但稀土元素含量低($w(\text{Re}_2\text{O}_3)<1\%$),稀土副矿物虽含量少(<2%),但稀土元素含量较高($w(\text{Re}_2\text{O}_3)=12\%\sim 65\%$)。对不同类型变质岩样品进行稀土矿物的稀土元素特征统

计(见表3),结合镜下矿物组合及百分含量鉴定结果,计算得到造岩矿物和稀土矿物的稀土贡献率(见表4)。结果表明,稀土元素主要赋存在少量副矿物中(71%~77%),由此可见,稀土副矿物贡献了全岩大部分的稀土元素,对全岩的稀土元素含量起决定性作用。

通常,在离子吸附型稀土矿的成矿过程中,母岩的风化产物,尤其是稀土矿物的风化,使得稀土元素得以在酸性淋滤作用下发生迁移,并以离子态吸附于黏土矿物颗粒表面,最终在风化层中富集成矿(宋云华等,1986;黄典豪等,1988;白鸽等,1989;吴澄宇,1989;包志伟,1992;池汝安等,2007;Sanematsu et al.,2013;2016a;b;Foley et al.,2015)。前人研究表明,赋存于花岗岩风化壳中的稀土矿体中,稀土元素的赋存状态多样,常有水合或羟基水合离子相>矿物相>胶态沉积相>>水溶相的规律(池汝安等,2007)。其中,75%~95%的稀土元素以水合或羟基水合阳离子形式吸附在高岭石、埃洛石等黏土矿物上,以及白云母、黑云母、水化黑云母和磁铁矿等矿物上,一般情

况下,稀土元素的品位跟吸附稀土元素的矿物的含量成正比(贺伦燕等,1989)。目前,关于变质岩风化壳的研究不多,资料显示,变质岩风化壳中的黏土矿物以伊利石和高岭石为主,均属稀土吸附饱和程度较高的矿物,尤其在GTZ矿区变质岩风化壳钻孔中,全风化层的黏土矿物含量可达37%,这说明赣南地区变质岩风化壳应同样具有容纳和吸附稀土阳离子的能力。

在离子吸附型稀土矿中,风化层内吸附的稀土元素多来自于母岩。母岩中的稀土矿物组合及性质,不仅影响其所形成的含可交换态稀土的风化壳的性质,而且决定着离子吸附型稀土成矿潜力。稀土丰度高的母岩对提供风化壳稀土物质来源是一个极有利的条件,且离子吸附型稀土矿体中REE含量可达到原岩的3倍以上(林传仙等,1994)。本文121件变质岩样品的平均 Σ REE含量 $>230 \times 10^{-6}$,其中尤以变质凝灰岩类(246×10^{-6})和变砂岩类(302×10^{-6})平均稀土元素含量最高,远大于成矿所需阈值(150×10^{-6})(白鸽等,1989),推测成矿后品位可达离子吸附

表3 赣南地区不同类型变质岩中稀土矿物的稀土元素特征

Table 3 Characteristics of REE minerals of different metamorphic rock types in South Jiangxi Province

矿物名称	岩性	n/个	w(B)/%			稀土矿物比例/%
			RE ₂ O ₃	LR ₂ O ₃	HRE ₂ O ₃	
独居石	板岩类	12	57.8	52.9	4.93	2~3
	千枚岩类	15	59.2	55.4	3.75	2~3
	片岩类	43	64.8	61.8	3.22	2~3
	变砂岩类	13	58.8	53.1	5.71	2~4
	变质凝灰岩类	31	61.8	57.5	4.33	2~4
	变粒岩类	32	62.2	57.9	4.28	2~3
磷钇矿	板岩类	3	56.3	0.50	55.8	2~3
	千枚岩类	4	49.7	0.44	49.2	2~3
	片岩类	5	55.2	0.97	54.3	2~3
	变砂岩类	4	62.7	1.18	61.5	2~4
	变质凝灰岩类	17	57.2	3.15	54.0	2~4
	变粒岩类	2	59.3	0.95	58.3	2~3
褐帘石	变砂岩类	2	16.7	15.4	1.37	1~3
	片岩类	8	18.8	17.1	1.67	1~3
绿泥石	变质凝灰岩类	3	15.0	14.0	1.00	1~2
	变粒岩类	1	12.8	11.7	1.11	1~2
钽石	变质凝灰岩类	1	6.46	1.94	4.51	0~1
金红石	板岩类	1	13.9	0.90	13.1	0~1
	变质凝灰岩类	2	15.9	0.27	15.7	0~1
钛铁矿	板岩类	4	2.54	0.28	2.26	0~2
	千枚岩类	3	1.44	0.08	1.33	0~2
	片岩类	1	1.48	0.80	0.24	0~2
水磷酸盐	变砂岩类	13	50.6	34.7	15.8	0~5
磷铝酸盐	片岩类	10	19.6	18.8	0.87	0~5
	变砂岩类	16	22.2	18.8	3.36	0~5

表4 赣南地区不同类型变质岩中矿物组合的稀土贡献率

岩性	矿物组合及对全岩稀土的贡献率	
	造岩矿物	稀土矿物
板岩类	长英质隐晶质+绢云母 23%	独居石+磷钇矿+锆石+含稀土钛铁矿+含稀土金红石 77%
千枚岩类	云母类19%,绿泥石4%,石英2%, 25%	独居石+磷钇矿+锆石+含稀土钛铁矿 75%
片岩类	黑云母12%,绢云母5%,白云母5%,石英3% 25%	独居石+磷钇矿+锆石+含稀土钛铁矿+磷酸盐类+褐帘石 75%
变砂岩类	黑云母15%,白云母5%,石英5%,长石类3%, 28%	独居石+磷钇矿+锆石+磷酸盐+水磷酸盐+褐帘石 72%
变质凝灰岩类	隐晶质黏土、火山灰等28%,石英1%, 29%	独居石+磷钇矿+锆石+含稀土金红石+含稀土 绿泥石+含稀土钍石+方铈石 71%
变粒岩类	长石类10%,黑云母10%,石英2%,白云母1%, 23%	独居石+磷钇矿+含稀土绿泥石+锆石 77%

型轻稀土矿边界品位(700×10^{-6})。除稀土元素丰度外,母岩中稀土副矿物在风化作用中的稳定性是稀土元素品位、配分特征的决定因素。前人研究认为,稀土矿物抗风化能力排序如下:稀土磷酸盐类→稀土铈钽酸盐类→稀土硅酸盐类→稀土氟碳酸盐类(杨学明等,1992; Bao et al., 2008)。相对易风化的稀土矿物组合是潜在的离子吸附型稀土成矿良好的物质来源(宋林康等,1991; Ishihara et al., 2008; 池汝安等, 2012; Papoutsas et al., 2013; Maulana et al., 2014; Sanematsu et al., 2015)。据此可看出,赣南地区的片岩类、变砂岩类和变质凝灰岩类均具有相对易风化的稀土矿物组合,为离子吸附型稀土的成矿提供良好的前提条件。此外,已有研究表明南岭科学深钻中库里组变质凝灰岩中发现了新奇钙钇矿,属易风化稀土矿物;区域上变质凝灰岩类和变质砂岩类地层厚度大,变质砂岩风化壳稀土含量变化大、风化程度不一;此外,赣南地区具备有利于稀土元素次生富集的条件,如高差适中的地形地貌、中等的风化条件(风化速率和剥蚀速率中等)(Sanematsu et al., 2016a; 2016b),综合以上认为,赣南地区广泛分布的变质岩,尤其是变质凝灰岩类和变砂岩类具有可观的离子吸附型稀土成矿潜力。

5 结论

- (1) 赣南地区变质岩中稀土副矿物对全岩稀土元素的贡献最大。
- (2) 不同岩性变质岩具有不同的稀土矿物组

合,同种稀土矿物在不同类型变质岩中稀土元素含量和配分特征稳定;部分稀土矿物成因与后期流体作用相关,为后期可能的成矿作用提供了良好的前提条件。

(3) 赣南地区广泛分布的变质岩中,片岩类、变砂岩类和变质凝灰岩类均具有相对易风化的稀土矿物组合,尤其变质凝灰岩类和变砂岩类,能为离子吸附型稀土成矿提供充足的物质来源,具有可观的离子吸附型稀土元素的成矿潜力。

References

- Bai G, Wu C Y and Ding X S. 1989. Formation conditions and distribution regularities of ion adsorption rare earth deposits in Nanling area[R]. Beijing: Institute of Mineral Deposit, Ministry of Geology and Mineral Resources(in Chinese).
- Bao Z W and Zhao Z H. 2008. Geochemistry of mineral with exchangeable ree in the weathering crusts of granitic rocks in South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 33: 519-535.
- Bao Z W. 1992. A geochemical study of the granitoid weathering crust in Southeast China[J]. *Geochemica*, 21(2): 166-174(in Chinese).
- Bern C R, Yesavage T and Foley N K. 2017. Ion-adsorption REEs in regolith of the Liberty Hill pluton, South Carolina, USA: An effect of hydrothermal alteration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 172: 29-40(in Chinese).
- Chi R A and Tian J. 2007. Review of weathered crust rare earth ore[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 25(6): 641-650(in Chinese).
- Chi R A, Tian J, Luo X P, Xu Z G and He Z Y. 2012. The basic research on the weathered crust elution-deposited rare earth ores[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 3(4): 1-13(in Chinese).

- Ding J, Song T R and Shi Y R. 2016. Occurrence and origin of monazites and rutile from sedimentary rocks of Chuanlinggou Formation in Changping area of Beijing[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 38(2): 172-181(in Chinese).
- Foley N and Ayuso R. 2015. REE enrichment in granite-derived regolith deposits of the southeastern United States: Prospective source rocks and accumulation processes[J]. *British Columbia Geological Survey Paper*, 3: 131-138.
- He L Y and Wang S N. 1989. Ion-adsorption rare earth deposits in southern China[J]. *Rare Earth*, 1: 39-44(in Chinese).
- Hong W X and Zhu X K. 2000. A microanalysis study on monazite composition distribution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 6(2): 167-172(in Chinese).
- Huang D H, Wu C Y and Han J Z. 1988. REE geochemistry and mineralization on characteristics of the Zudong and Guanxi granites, Jiangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 4: 311-328(in Chinese).
- Huo M Y. 1992. Distribution characteristics of the weathering-crust-type rare-earth resources in Nanling, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 7(1): 64-70(in Chinese).
- Ishihara S, Hua R M, Hoshino M and Murakami H. 2008. REE abundance and REE minerals in granitic rocks in the Nanling range, Jiangxi Province, southern China and generation of the REE-rich weathered crust deposits[J]. *Resource Geology*, 58(4): 355-372.
- Lin C X and Zheng Z P. 1994. Experimental studies on metallogenic mechanism of weathering crust-leaching REE deposits in southern China[J]. *Geochemica*, 23(2): 189-198(in Chinese).
- Liu Y and Hou Z Q. 2017. A synthesis of mineralization styles with an integrated genetic model of carbonatite-syenite-hosted REE deposits in the Cenozoic Mianning-Dechang REE metallogenic belt, the eastern Tibetan Plateau, southwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137:35-79.
- Liu Y, Hou Z Q, Zhang R Q, Wang P, Gao J F and Raschke M B. 2019. Zircon alteration as a proxy for rare earth element mineralization processes in carbonatite-nordmarkite complexes of the Mianning-Dechang rare earth element belt, China[J]. *Econ. Geol.*, 114(4): 719-744.
- Liu Z C, Wu F Y, Guo C L, Zhao Z F, Yang J H and Sun J F. 2011. In situ U-Pb dating of xenotime by laser ablation (LA)-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(33): 2772-2781(in Chinese).
- Maulana A, Yonezu K and Watanabe K. 2014. Geochemistry of rare earth elements (REE) in the weathered crusts from the granitic rocks in Sulawesi Island, Indonesia[J]. *Journal of Earth Science*, 25(3): 460-472.
- Papoutsas A D and Pe-PiPer G. 2013. The relationship between REE-Y-Nb-Th minerals and the evolution of an A-type granite[J]. *Wentworth Pluton, Nova Scotia, American Mineralogist*, 98: 444-462.
- Parrish R R. 1990. U-Pb Dating of monazite and its application to geological problems[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 27(11): 1431-1450.
- Qiu K F and Yang L Q. 2011. Genetic feature of monazite and its U-Th Pb dating: Critical considerations on the tectonic evolution of Sanjiang Tethys[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2721-2732(in Chinese).
- Ruan D Y, Zhu Y D, Cong X D, Zhou X Q and Wang J B. 1985. Preliminary study of magma evolution of REE igneous rocks in the east section of Nanling[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 3(4): 1-5(in Chinese).
- Sanematsu K and Kon Y. 2013. Geochemical characteristics determined by multiple extraction from ion-adsorption type REE ores in Dingnan County of Jiangxi Province, South China[J]. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 64(11/12), 313-330.
- Sanematsu K and Watanabe Y. 2016a. Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits[C]. *Reviews in Economic Geology Vol.18. Society of Economic Geologists*: 55-79.
- Sanematsu K, Ejima T, Kon Y, Manaka T, Zaw K, Morita S and Seo Y. 2016b. Fractionation of rare-earth elements during magmatic differentiation and weathering of calc-alkaline granites in southern Myanmar[J]. *Mineralogical Magazine*, 80(1): 77-102.
- Sanematsu K, Kon Y and Imai A. 2015. Influence of phosphate on mobility and adsorption of REEs during weathering of granites in Thailand[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111(1): 14-30.
- Schandl E S and Gorton M P. 2004. A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits[J]. *Econ. Geol.*, 99(5): 1027-1035.
- Shu L S, Zhou X M, Deng P and Yu X Q. 2006. Principal geological features of Nanling tectonic belt, South China[J]. *Geological Review*, 52(2): 251-265(in Chinese).
- Shu L S. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035-1053(in Chinese).
- Song L K, Chen C and Liu L W. 1991. Characteristics of the rare earth element minerals from Guoposhan granite in Hunan[J]. *Hunan Geology*, 10(1): 43-51(in Chinese).
- Song Y H and Shen L P. 1982. Discussion on clay minerals occurring in the weathered crust of a certain acid volcanic rock in Jiangxi Province and their formation conditions[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 3: 207-212(in Chinese).
- Song Y H, Shen L P and Wang X J. 1986. A preliminary study on rare earth elements in the weathering crust of some rocks[J]. *Chinese Science Bulletin*, 9: 695-698(in Chinese).
- Wang D H, Zhao Z, Yu Y, Wang C H, Dai J J, Sun Y, Zhao T, Li J K, Huang F, Chen Z Y, Zeng Z L, Deng M C, Zou X Y, Huang H G, Zhou H and Feng W J. 2017. A Review of the achievements in the survey and study of ion-adsorption type REE deposits in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(3): 317-325(in Chinese).
- Wang Z, Zhao Z, Zou X Y, Chen Z Y and Tu X J. 2018. Petrogeochemical characteristics and metallogenic potential of epimetamorphic rocks in South Jiangxi Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 37(1): 96-107(in Chinese).
- Wang Z L, Xu D R, Monika A K, Wu C J and Yu L L. 2015. Genesis of

- and CHIME dating on monazite in the Shilu iron ore deposit, Hainan Province of South China, and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 200-216(in Chinese).
- Wu C Y. 1989. Rare earth mineralization in weathering crust—a non-equilibrium process[J]. *Mineral Deposits*, 8(4): 85-90(in Chinese).
- Yang X M and Zhang P S. 1992. Study on the occurrence and mass balance of rare earth elements in granite rocks[J]. *Rare Earth*, 13(5): 6-11(in Chinese).
- Yang Y Q, Hu Z S and Luo Z M. 1981. Geological characteristics of mineralization of rare earth deposits of the ion-adsorption type and their prospecting direction[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 102-118(in Chinese).
- Yuan Z X, Li J K, Wang D H, Zheng G D, Lou D B, Chen Z H, Zhao Z and Yu Y. 2012. Metallogenic of rare earth element deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Zhang P S, Tao K J and Yang Z M. 1998. Chinese rare earth mineralogy[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Zhang Z H. 1990. A study on weathering crust ion adsorption type REE deposits, South China[J]. *Contribution to Geology and Mineral Resource Research*, 5(1): 57-71(in Chinese).
- Zhao Z, Wang D H, Chen Z Y, Guo N X, Liu X X and He H H. 2014. Metallogenic specialization of rare earth mineralized igneous rocks in the eastern Nanling region[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 255-263(in Chinese).
- Zhao Z, Wang D H, Chen Z H and Chen Z Y. 2017. Progress of research on Metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in the Nanling range[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2814-2827(in Chinese).
- Zhao Z, Chen Z H, Zou X Y, Wang D H and Chen Z Y. 2018. REE mineralization of epimetamorphic rocks from an ion-adsorption type REE deposit in southern Jiangxi Province[J]. *Earth Science*, 43(10): 3652-3663(in Chinese).
- 地球化学及矿化特征[J]. *地质学报*, 4: 311-328.
- 霍明远. 1992. 中国南岭风化壳型稀土资源分布特征[J]. *自然资源学报*, 7(1): 64-70.
- 林传仙, 郑作平. 1994. 风化淋积型稀土矿床成矿机理的实验研究[J]. *地球化学*, 23(2): 189-198.
- 刘志超, 吴福元, 郭春丽, 赵子福, 杨进辉, 孙金凤. 2011. 磷钇矿 U-Pb 年龄激光原位 ICP-MS 测定[J]. *科学通报*, 56(33): 2772-2781.
- 邱昆峰, 杨立强. 2011. 独居石成因特征与 U-Th-Pb 定年及三江提斯构造演化研究例析[J]. *岩石学报*, 27(9): 2721-2732.
- 阮道源, 朱余德, 从献东, 周小琪, 王京彬. 1985. 南岭东段稀土岩浆岩岩浆演化初探[J]. *中国稀土学报*, 3(4): 1-5.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 余心起. 2006. 南岭构造带的基本地质特征[J]. *地质论评*, 52(2): 251-265.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 31(7): 1035-1053.
- 宋林康, 陈春, 刘力文. 1991. 湖南姑婆山花岗岩稀土矿物特征[J]. *湖南地质*, 10(1): 43-51.
- 宋云华, 沈丽璞. 1982. 江西某酸性火山岩风化壳中粘土矿物及其形成条件的讨论[J]. *矿物学报*, 3: 207-212.
- 宋云华, 沈丽璞, 王贤觉. 1986. 某些岩石风化壳中稀土元素的初步探讨[J]. *科学通报*, 9: 695-698.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 王成辉, 代晶晶, 孙艳, 赵汀, 李建康, 黄凡, 陈振宇, 曾载淋, 邓茂春, 邹新勇, 黄华谷, 周辉, 冯文杰. 2017. 我国离子吸附型稀土矿产科学研究和调查评价进展[J]. *地球学报*, 38(3): 317-325.
- 王臻, 赵芝, 邹新勇, 陈振宇, 涂雪静. 2018. 赣南浅变质岩岩石地球化学特征及稀土成矿潜力研究[J]. *岩矿测试*, 37(1): 96-107.
- 王智琳, 许德如, Monika A K, 吴传军, 于亮亮. 2015. 海南石碌铁矿独居石的成因类型、化学定年及地质意义[J]. *岩石学报*, 31(1): 200-216.
- 吴澄宇. 1989. 风化壳稀土成矿作用——一种不平衡过程[J]. *矿床地质*, 8(4): 85-90.
- 杨学明, 张培善. 1992. 花岗岩中稀土元素的赋存状态及质量平衡研究[J]. *稀土*, 13(5): 6-11.
- 杨岳清, 胡淙声, 罗展明. 1981. 离子吸附型稀土矿床成矿地质特征及找矿方向[J]. *中国地质科学院院报矿床地质研究所分刊*, 102-118.
- 袁忠信, 李建康, 王登红, 郑国栋, 姜德波, 陈郑辉, 赵芝, 于扬. 2012. 中国稀土矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社.
- 张培善, 陶克捷, 杨主明, 杨学明. 1998. 中国稀土矿物学[M]. 科学出版社.
- 张祖海. 1990. 华南风化壳离子吸附型稀土矿床[J]. *地质找矿论丛*, 5(1): 57-71.
- 赵芝, 王登红, 陈振宇, 郭娜欣, 刘新星, 何哈哈. 2014. 南岭东段与稀土矿有关岩浆岩的成矿专属性特征[J]. *大地构造与成矿学*, 38(2): 255-263.
- 赵芝, 王登红, 陈郑辉, 陈振宇. 2017. 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*, 91(12): 2814-2827.
- 赵芝, 陈郑辉, 邹新勇, 王登红, 陈振宇. 2018. 赣南某离子吸附型稀土矿床浅变质岩的矿化特征[J]. *地球科学*, 43(10): 3652-3663.

附中文参考文献

- 白鸽, 吴澄宇, 丁孝石. 1989. 南岭地区离子型稀土矿床形成条件和分布规律[R]. 北京: 地质矿产部矿床地质研究所.
- 包志伟. 1992. 华南花岗岩风化壳稀土元素地球化学研究[J]. *地球化学*, 21(2): 166-174.
- 池汝安, 田君. 2007. 风化淋积型稀土矿床评述[J]. *中国稀土学报*, 25(6): 641-650.
- 池汝安, 田君, 罗仙平, 徐志高, 何正艳. 2012. 风化淋积型稀土矿的基础研究[J]. *有色金属科学与工程*, 3(4): 1-13.
- 丁静, 宋天锐, 石玉若. 2016. 北京昌平地区串岭沟组沉积岩中独居石、金红石赋存状态及其成因[J]. *地球科学与环境学报*, 38(2): 172-181.
- 贺伦燕, 王似男. 1989. 我国南方离子吸附型稀土矿[J]. *稀土*, 1: 39-44.
- 洪文兴, 朱祥坤. 2000. 独居石微粒微区成分分布的研究[J]. *高校地质学报*, 6(2): 167-172.
- 黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 1988. 江西足洞和关西花岗岩的稀土元素