越城岭岩体稀土元素分带特征及其对岩体成因的指示意义

熊明伟[1,2]

(1. 湖南省地球物理地球化学调查所,湖南 长沙 410116;
2. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院,湖南 湘潭 411100)

摘 要:以《湖南省越城岭地区稀有稀散金属矿产调查评价》项目为依托,通过数据对比、图解分析等方法,对该区 500 余件岩石、土壤样进行统计,分析了不同岩相带、土壤垂直分带中稀土元素含量特征及配分模式,讨论了稀土元素对越城岭岩体成因的指示意义。研究结果表明,越城岭岩体各岩相带内稀土元素含量具有明显的差异性,且分带性明显;土壤中稀土相对岩石更富集;该区稀土元素曲线配分右倾;轻稀土相对重稀土较富集;普遍具 Eu 中等负异常;稀土元素特征指示该岩体具有重熔型花岗岩的特征。

关键词:越城岭岩体;稀土元素;构造意义

中图分类号:P595 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-0277(2024)02-0121-07

越城岭岩体位于湘桂边界,横跨湖南省新宁县、东安县及广西壮族自治区资源县、全州市,面积 1391 km^2,以北北东向的长条状岩基产出。区域上处于北东向宁乡—新宁断裂与北西向怀化—道县深断裂交汇地带,祁阳山字型构造之南翼反射弧与南岭东西构造带中段北缘的复合地段[1~3]。越城岭复式花岗岩体,侵入期次为加里东期—印支期—燕山期,岩体北部以燕山期为主[4]。

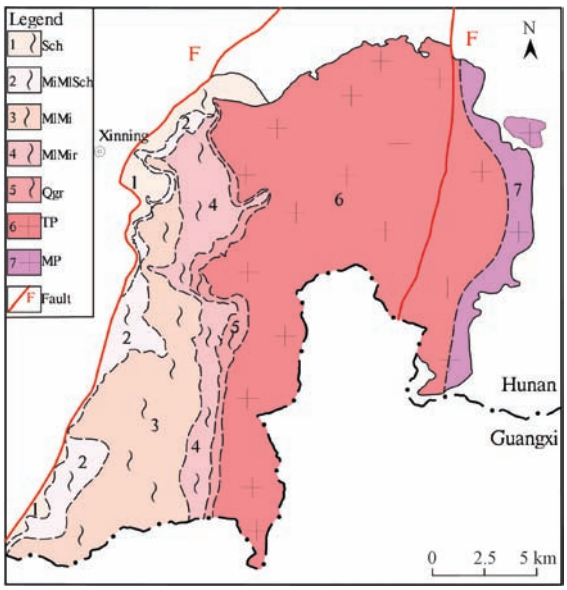
1 岩性分带特征

越城岭岩体分为过渡相(TP)、边缘相(MP)和片麻状花岗岩带。过渡相分布于岩体中部,以中粗粒斑状黑云母二长花岗岩为主;边缘相分布于岩体东部及东南部边缘,以细粒黑云母二长花岗岩为主;片麻状花岗岩带,分布于岩体西部,以片麻状糜棱岩化花岗岩和片麻状碎裂花岗岩为主,宽度 4 km~12 km,呈不规则长条状,与过渡带呈渐变关系,据研究,其定向构造形成原因主要为断裂变质和剪切深熔作用[5]。在断裂变质、剪切深熔作用下,刚性花岗岩发生明显的破碎-交代-重熔,形成了片麻理化、片理化、糜棱化、碎裂化的片麻状花岗岩[3]。从岩体西部边界到岩体中心,这种定向构造程度、片麻理化、糜棱化程度逐渐降低甚至消失。岩带内片麻理倾向为 270°~300°,倾角 20°~40°。岩带内普

收稿日期:2022-06-24
基金项目:湖南省级探矿权采矿权价款地质勘查项目(201203092)
作者简介:熊明伟(1990-),男,福建泰宁人,高级工程师,主要从事南岭花岗岩成矿专属性研究,E-mail:912525379@qq.com
DOI:10.3724/S1004-0277.202402012

遍发育花岗伟晶岩脉。

片麻状花岗岩带分为五个亚带,自西向东依次为以石英二云糜棱片岩为主的糜棱片岩亚带(Sch)、以眼球状、条带状、条纹状糜棱片麻岩为主的糜棱片麻岩亚带(MiMlSch)、以眼球状、条带状、条纹状初糜棱钾长花岗片麻岩为主的初糜棱钾长花岗片麻岩亚带(MlMi)、以糜棱岩化钾长花岗片麻岩、糜棱岩化斑状钾长花岗片麻岩为主的糜棱岩化钾长花岗片麻岩亚带(MlMir)、以弱片麻状中粗粒花岗岩、弱片麻状斑状花岗岩为主的弱片麻状花岗岩带(Qgr)[6~8](图 1)。



1:糜棱片岩亚带(Sch);2:糜棱片麻岩亚带(MiMlSch);3:初糜棱钾长花岗片麻岩亚带(MlMi);4:糜棱岩化钾长花岗片麻岩亚带(MlMir);5:弱片麻状花岗岩带(Qgr);6:过渡相(TP);7:边缘相(MP);F:断层

图 1 越城岭岩体北段岩相分带图

1:Mylonite schist subzone;2:Mylonite gneiss subzone;3:Primary mylonite K-feldspar granitic gneiss subzone;4:Mylonitized K-feldspar granite gneiss subzone;5:Weak gneissic granite belt;6:Transitional phase;7:Marginal phase;F:Fault zone

Fig. 1 Zoning map of the northern Yuechengling intrusion

2 岩石稀土元素地球化学特征

越城岭岩体岩石稀土总量变化较大,最低为 32.72×10^{-6}、最高为 429.41×10^{-6},从岩体过渡带→弱片麻状花岗岩亚带→糜棱岩化钾长花岗岩亚带→初糜棱钾长花岗片麻岩亚带→糜棱片麻岩亚带→糜棱片岩亚带,随着定向构造、变质程度的增强,稀土总量具有明显的增加趋势。LREE/HREE 为 6.26~18.74、La_N/Yb_N 为 4.57~34.05、δEu 为 0.20~0.60,大多数小于等于 0.51、δCe 为 1.07~1.85(表 1);球粒陨石标准化分布曲线为明显右倾的"海鸥"型,显示出较弱的 Ce 正异常以及中等程度的 Eu 负异常(图 2)。

表 1 越城岭岩体岩石稀土元素有关参数/$\times10^{-6}$

Table 1 REE parameters of Yuechengling pluton/$\times10^{-6}$

Zone	Sample	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	La_N/Yb_N	δEu	δCe
TP	Y1	31.7	27.4	4.37	6.26	5.65	0.50	1.07
Qgr	Y2	146	129	16.4	7.91	4.57	0.51	1.67
MlMir	Y3	195	177	17.8	9.98	9.93	0.60	1.10
MlMi	Y4	242	229	12.5	18.30	15.50	0.47	1.85
MiMlSch	Y5	274	260	13.9	18.74	34.05	0.35	1.46
Sch	Y6	419	388	31.5	12.30	9.37	0.20	1.81

Note:The subscript N represents the standardization of chondrite meteorites[9]

3 土壤稀土元素地球化学特征

土壤稀土元素主要来自成土母岩,故其含量受成土母质控制,所有成土母质的稀土元素分布模式特征也必然反映到土壤的稀土元素分布模式中[10]。

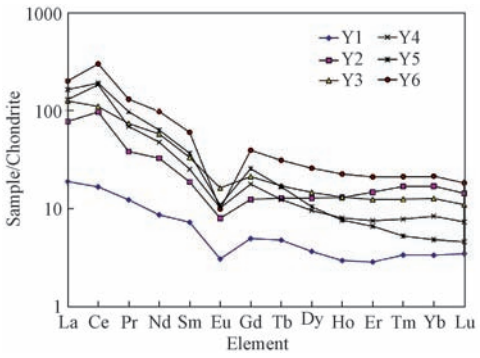


图 2　岩石稀土元素球粒陨石标准化配分模式

Fig. 2　The chondrite-normalized REE distribution patterns of rock

3.1　土壤稀土含量平均值

对越城岭岩体各带四百余件土壤样品进行统计,选出 ΣREE 最小的样品 T1、最大的样品 T2,并统计出土壤稀土元素含量平均值 T(表 2、表 3)。

土壤稀土总量变化较大,最低为 48.28×10^{-6},最高为 815.73×10^{-6},平均值为 277.52×10^{-6}。该区稀土相对贫瘠,离子吸附型稀土成矿前景不佳。平均值里,LREE/HREE 为 11.74、La_N/Yb_N 为 11.28、δEu 为 0.36、δCe 为 1.29。平均值球粒陨石标准化分布曲线为典型的右倾"海鸥"型,且具有明显的 Ce 正异常和中等强度的 Eu 负异常(图 3)。

表 2　越城岭岩体土壤稀土元素分析结果/$\times10^{-6}$

Table 2　REE analysis results of Yuechengling rock mass soil/$\times10^{-6}$

Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
T(mean)	52.53	139	11.89	43.15	8.08	0.9	6.98	1.01	5.68	1.09	2.99	0.47	3.14	0.43
T1(min)	11	17.4	2.35	7.96	1.78	0.31	1.63	0.35	2.36	0.44	1.14	0.18	1.22	0.16
T2(max)	234	172	54.2	201	38.9	3.78	32.4	5.48	31.2	5.94	15.6	2.44	16.5	2.29

表 3　越城岭岩体土壤稀土元素有关参数/$\times10^{-6}$

Table 3　REE related parameters of Yuechengling rock mass soil/$\times10^{-6}$

Sample	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	La_N/Yb_N	δEu	δCe
T(mean)	277.52	256.00	21.79	11.74	11.28	0.36	1.29
T1(min)	48.28	40.80	7.48	5.45	6.08	0.55	0.79
T2(max)	815.73	704.00	11.85	6.29	9.56	0.32	0.36

Note:The subscript N represents the standardization of chondrite meteorites[9]

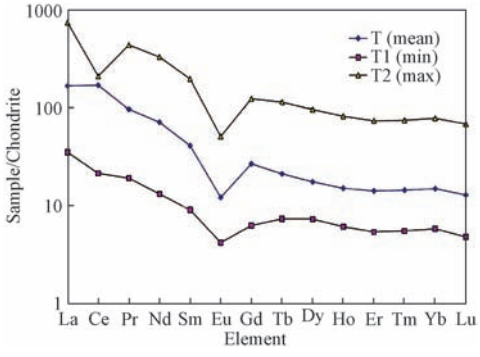


图 3　土壤稀土元素球粒陨石标准化配分模式

Fig. 3　The chondrite-normalized REE distribution patterns of soil

3.2　土壤稀土元素垂直分带特征

在岩石风化壳中,稀土元素的次生富集具有明显的垂直分带性,即稀土元素主要在全风化壳中部富集,向上部表土带及下部半风化带和母岩均有贫化趋势[11,12]。

在本区选取了三个土壤稀土垂直剖面 P1、P2、P3 进行分析(表 4、图 4 至图 6)。

三个剖面中垂直分带性最明显的是 P1,其他两个剖面都有个别样出现异常,但总体而言都能体现土壤垂直剖面上稀土含量有分带性,即从表土层→全风化层→半风化层→母质层,稀土含量

先增高后减少,最富集的部位是全风化层。垂直剖面总体能反映出稀土元素垂直分带性,但是全风化壳中部的含量相对上下差距并不是很大,且个别并不严格遵从分带性规律,这可能是由本区成土母质稀土含量较低,致土壤稀土含量也较低,另外土壤中稀土元素发生离子吸附作用不够强烈,所以在土壤稀土垂直剖面上分带性不够显著。

表 4 P1~P3 稀土元素分析结果/$\times10^{-6}$

Table 4 Analysis results of rare earth elements in P1~P3/$\times10^{-6}$

Sample		Depth/m	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
P1	1	0.5	32.5	75	7.31	27.4	4.88	0.67	4.04	0.56	3.07	0.60	1.7	0.27	1.86	0.27	160.13
	2	1.0	35.5	135	8.16	30.3	5.25	0.68	4.67	0.56	2.75	0.50	1.38	0.22	1.58	0.22	226.77
	3	1.5	108.0	157	24.90	90.6	14.20	1.58	10.20	1.24	5.89	1.07	2.94	0.44	3.00	0.43	421.49
	4	2.0	87.4	114	20.20	74.2	11.80	1.30	8.22	1.00	4.72	0.85	2.36	0.36	2.44	0.34	329.19
	5	2.5	85.5	101	19.90	73.4	12.30	1.51	8.75	1.15	5.64	1.03	2.80	0.43	2.95	0.41	316.77
P2	1	0.5	48.7	144	10.70	38.8	6.97	0.92	6.07	0.84	4.51	0.84	2.22	0.34	2.18	0.30	267.39
	2	1.0	47.5	178	10.40	38.3	6.87	0.96	6.24	0.82	4.49	0.85	2.27	0.35	2.27	0.31	299.63
	3	1.5	48.2	169	11.00	40.7	7.33	1.00	6.65	0.89	5.13	1.01	2.79	0.45	3.09	0.43	297.67
	4	2.0	54.2	184	12.50	45.8	8.12	1.10	7.21	0.95	5.10	0.97	2.61	0.39	2.61	0.35	325.91
	5	2.5	45.4	134	10.20	37.3	6.64	0.91	5.98	0.80	4.46	0.84	2.35	0.38	2.60	0.37	252.23
P3	1	0.5	62.2	186	14.20	52.0	9.60	1.18	8.20	1.14	6.00	1.12	2.98	0.46	2.98	0.40	348.46
	2	1.0	60.1	163	12.80	45.9	8.25	1.04	7.22	0.98	5.19	0.96	2.50	0.38	2.44	0.33	311.09
	3	1.5	80.5	252	18.00	65.6	12.20	1.54	10.80	1.51	8.22	1.53	4.08	0.63	4.21	0.57	461.39
	4	2.0	80.6	219	16.50	57.6	10.00	1.30	8.86	1.22	6.62	1.22	3.26	0.50	3.34	0.45	410.47

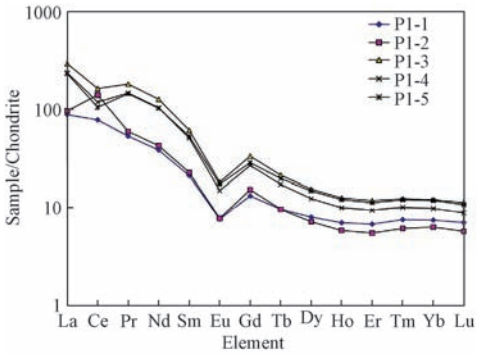


图 4 P1 稀土元素球粒陨石标准化配分模式

Fig. 4 The chondrite-normalized REE distribution patterns of P1 samples

另外土壤稀土含量除了受成土母质控制外,还受其他因素的影响,比如气候条件。在温暖而潮湿的气候条件下发育的土壤,其所含稀土有淋失现象,有些淋滤作用强的地方其稀土元素分布模式曲线较不光滑,甚至出现锯齿状[11,12]。另外土壤中稀土还受腐殖质与粘粒的含量等因素的影响。

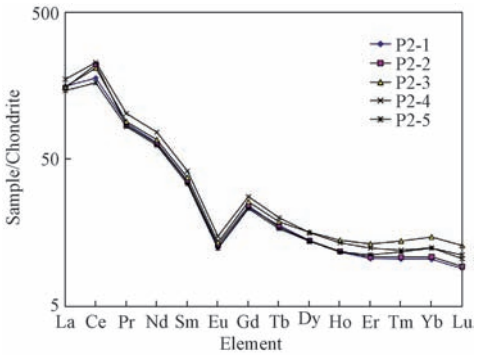


图 5 P2 稀土元素球粒陨石标准化配分模式

Fig. 5 The chondrite-normalized REE distribution patterns of P2 samples

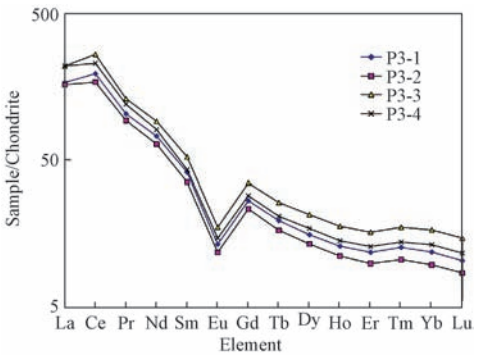


图 6　P3 稀土元素球粒陨石标准化配分模式

Fig. 6　The chondrite-normalized REE distribution patterns of P3 samples

4　岩石、土壤稀土元素地球化学特征对比及其对岩体成因的指示意义

4.1　岩石、土壤稀土参数对比

综上,越城岭岩体稀土元素具以下特征:

(1)土壤平均稀土总量比多数岩石稀土总量高,说明岩石在风化过程中发生了稀土富集作用。

(2)岩石风化成土壤后,轻重稀土比分异较小。

(3)土壤平均 Eu 负异常比多数岩石 Eu 负异常程度低。

(4)土壤平均 δCe 比岩石 δCe 稍大,甚至部分略小。据前人研究 Ce 是变价元素,风化过程中分异较明显,除了呈 Ce^{3+} 外,在氧化条件下可变为 Ce^{4+},因此其离子电位与 RE^{3+} 差别较大而发生分离。在岩石风化过程中,Ce^{4+} 在弱酸性条件下极易发生水解而停留在原地,致使淋滤出的溶液中贫 Ce,残留物中则富 Ce,产生 Ce 异常[13,14]。然而本区土壤 δCe 与岩石 δCe 分异不大,这说明本区岩石风化成土壤过程中淋滤作用不是很强,另外也可能是岩石样数量偏少、个别样品代表性不足所致。

4.2　岩石、土壤稀土共同特征及指示意义

在华南地区,花岗岩类的时代、成因和它们的成分三者之间在整个地壳演化过程中有着统一的联系。前寒武纪(雪峰期)和下古生代(加里东期)花岗岩类以交代成因为主,成分上偏中酸性。中生代(燕山期)以重熔岩浆成因为主,成分亦以酸性为主,而上古生代(海西期)的花岗岩则处于两者之间。华南花岗岩的稀土分配模式与上述三种成因类型相关,稀土元素分布模式属于第一类者多为年代老、交代成因、中酸性岩。属第二三类者为燕山期重熔岩浆成因的花岗岩类,稀土元素的分配模式因分异作用的演化、发展阶段而异[11]。

越城岭岩体土壤、岩石稀土整体分配模式一致,都表现为较明显的正 Ce 异常、中等程度的负 Eu 异常、轻稀土相对重稀土都较富集以及球粒陨石标准化分布曲线均为右倾的“海鸥”型。这与南岭燕山期重熔岩浆成因的花岗岩类稀土元素的分配模式[11,15]具有极强的相似度。

对本区稀土元素做 Σ(La-Nd)—Σ(Sm-Ho)—Σ(Er-Lu)三角图解(图 7、图 8),显示为明显的 Σ(La-Nd)富集。稀土元素从岩体中心到过渡带、边缘带,轻稀土向重稀土占优势的方向演化。三角图解指示了越城岭岩体西部片麻状花岗岩带的稀土具有明显的 Σ(La-Nd)占优势特征,趋于岩体中心或过渡带。

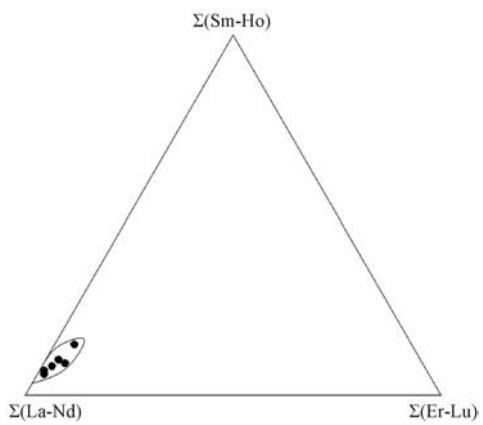


图 7　岩石稀土元素三角图解

Fig. 7　Rock REE triangle diagram

据综合研究,南岭中生代花岗岩为陆壳重熔型,总体上表现为强烈或中等 Eu 亏损,稀土元素球粒陨石标准化配分模式图呈“V”字形[16],越城岭岩体与这一特征高度吻合,说明越城岭岩体北部的岩带也属于华南中生代陆壳重熔型花岗岩类的范畴。

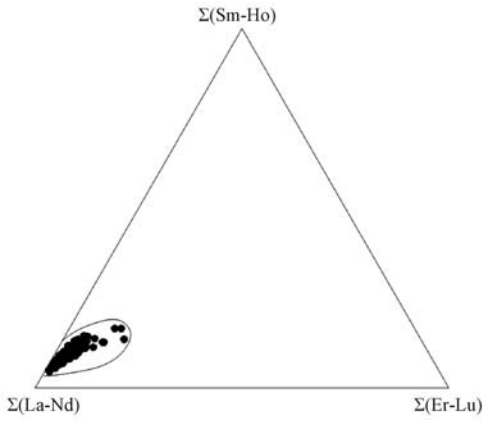


图 8 土壤稀土元素三角图解

Fig. 8 Soil REE triangle diagram

5 结论

1. 越城岭岩体各相带、亚带内稀土元素含量具有较明显的分带性。从岩体中部过渡带向西到岩体边界,随着变质程度、定向构造程度的增强,其稀土含量也增加;从表土层→全风化层→半风化层→母质层,稀土含量先增加后减少,且稀土最富集部位为全风化层。

2. 越城岭岩体稀土配分模式具有 Ce 正异常、Eu 中等程度负异常、轻稀土富集、球粒陨石标准化分布曲线为“海鸥”型、Σ(La-Nd)占优势等特征,指示该岩体属燕山期陆壳重熔型花岗岩类。

参考文献:

[1] 唐清国. 新宁幅 1∶5 万区域地质调查报告[R]. 湖南省:湖南省地质矿产局四一八队,1988.
Tang Q G. 1∶50000 regional geological survey report of Xinning sheet[R]. Hunan. 418 team, Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources,1988.

[2] 唐清国. 大庙口幅 1∶5 万区域地质调查报告[R]. 娄底:湖南省地质矿产局四一八队,1988.
Tang Q G. 1∶50000 regional geological survey report of Damiaokou sheet[R]. Loudi: Hunan. 418 team, Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources,1988.

[3] 唐清国. 白沙幅、新宁幅、大庙口幅 1∶5 万区域地质调查报告[R]. 娄底:湖南省地质矿产局四一八队,1988.
Tang Q G. 1∶50000 regional geological survey report of Xinning Baisha Damiaokou sheet[R]. Loudi: Hunan. 418 team, Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1988.

[4] 贾宝华. 中国区域地质志(湖南志)[M]. 北京:地质出版社,2017.
Jia B H. Regional Geology of China (Hunan Chronicles)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.

[5] 梁廷苞,王化云. 猫儿山、越城岭花岗岩类型及其片麻状花岗岩带的成因探讨[J]. 广西地质,1986,12(2):79-84.
Liang T B, Wang H Y. Discussion on the types of Maoershan and Yuechengling granites and the genesis of gneissic granite belt[J]. Guangxi Geology, 1986, 12 (2):79-84.

[6] 杨树锋,刘汉军,熊明伟. 湖南省越城岭地区稀有稀散金属矿产调查评价报告[R]. 长沙:湖南省地球物理地球化学勘查院,2016.
Yang S F, Liu H J, Xiong M W. Investigation and Evaluation Report on Rare and Rare Metal Mineral Resources in the Yuechengling Area of Hunan Province [R]. Changsha: Hunan Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, 2016.

[7] 苏正伟, 黄逢秋, 杨树峰, 刘显丽, 陈建国. 越城岭岩体地球化学特征及稀有金属资源潜力预测[J]. 中国矿业, 2018, 27(12): 167-172.
Su Z W, Huang F Q, Yang S F, Liu X L, Chen J G. Geochemical characteristics of Yuechengling intrusive rock and prediction of rare metals[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(12): 167-172.

[8] 杨树锋. 湖南省越城岭地区水系沉积物测量地球化学特征及找矿远景区划分. [R]. 长沙:湖南省地质学会学术年会,2016.
Yang S F. Geochemical Characteristics of Sediment Measurements in the Yuechengling Area of Hunan Province and Classification of Prospecting Areas [R] Changsha: Academic Annual Meeting of Hunan Geological Society, 2016.

[9] Boynton W V. Geochemistry of the rare-earth elements. Meteorite studies[J]. Geochem,1984,2:63-114.

[10] 马英军, 霍润科, 徐志方, 张辉, 刘丛强. 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, 19(1): 87-94.
Ma Y J, Huo R K, Xu Z F, Zhang H, Liu C Q. REE behavior and influence factors during chemical weathering[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(1): 87-94.

[11] 王中刚, 赵振华, 赵惠兰. 华南花岗岩的稀土元素分布模式[J]. 地球化学, 1980, 9(1): 1-12.
Wang Z G, Zhao Z H, Zhao H L. REE distribution patterns of granites in South China [J]. Geochimica, 1980, 9(1): 1-12.

[12] 王中刚,于学元,赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京:科学出版社,1989.
Wang Z G, Yu X Y, Zhao Z H. Rare Earth Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989.

[13] 陈德潜, 吴静淑. 离子吸附型稀土矿床的成矿机制[J]. 中国稀土学报, 1990, 8(2): 175-179.
Chen D Q, Wu J S. Metallogenic mechanism of ion adsorption rare earth deposits[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 1990, 8(2): 175-179.

[14] 陈德潜, 陈刚. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
Chen D Q, Chen G. Practical Rare Earth Element Geochemistry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990.

[15] 谭俊, 魏俊浩, 李艳军, 李闫华, 鄢云飞. 南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩成矿的有关问题[J]. 地质论评, 2007, 53(3): 349-362.
Tan J, Wei J H, Li Y J, Li Y H, Yan Y F. Some reviews on diagenesis and metallogeny of the Mesozoic crustal remelting granitoids in the Nanling region[J]. Geological Review, 2007, 53(3): 349-362.

[16] 周新民. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京:科学出版社,2007.
Zhou X M. Genesis and Lithospheric Dynamic Evolution of Late Mesozoic Granites in Nanling Area[M]. Beijing:Science Press, 2007.

REE Zoning Characteristics of Yuechengling Pluton and Its Significance to the Genesis of Rock Mass

XIONG Ming-wei[1,2]

(1. *Hunan Provincial Institute of Geophysical and Geochemical Survey*, *Changsha* 410116, *China*;
2. *School of Earth Science and Spatial Information Engineering*, *Hunan University of Science and Technology*, *Xiangtan* 411100, *China*)

Abstract: Based on the project "Investigation and Evaluation of Rare and Rare Metal Mineral Resources in the Yuechengling Area of Hunan Province", more than 500 rock and soil samples in the area were statistically analyzed through data comparison, graphical analysis, and other methods. The content characteristics and distribution patterns of rare earth elements in different lithofacies zones and vertical soil zones were analyzed, and the indicative significance of rare earth elements on the genesis of the Yuechengling rock mass was discussed. The research results indicate that there are significant differences in the content of rare earth elements in various lithofacies zones of the Yuechengling rock mass, and the zoning is obvious; Rare earth elements are more abundant in soil compared to rocks; The distribution curve of rare earth elements in this area leans to the right; Light rare earth elements are relatively enriched compared to heavy; The Eu medium negative anomaly is common; The characteristics of rare earth elements indicate that the rock mass has the characteristics of remelted granite.

Key words: Yuechengling pluton; REE; tectonic significance