第65卷 第4期 地 质 论 评 GEOLOGICAL REVIEW Vol. 65 No. 4
2019年7月 July, 2019

黔东南煌斑岩类风化壳中稀土元素富集特征及找矿意义

杨光海[1)]，高军波[1)]，杨瑞东[1)]，田亚洲[1)]，杨光忠[2)]，徐海[1)]，冯康宁[1)]
1）贵州大学资源与环境工程学院，贵阳，550025；
2）贵州省地质矿产勘查开发局101地质大队，贵州凯里，556000

内容提要：以往研究认为煌斑岩类及其风化壳因规模小且稀土元素难以高度富集，不易形成稀土元素矿床。然而，本文通过对黔东南麻江隆昌、龙山、大塘、石板寨及和尚坟地区20件风化煌斑岩类中稀土元素进行测试分析发现，风化煌斑岩类中稀土元素含量普遍偏高，ΣREE+Y介于$558.78\times10^{-6}\sim2409.94\times10^{-6}$（平均$1461.21\times10^{-6}$），其中LREE平均$1346.44\times10^{-6}$，HREE平均$53.52\times10^{-6}$，稀土元素具有高度富集甚至成矿的潜力。其中石板寨、和尚坟煌斑岩风化程度较强，稀土元素富集程度较高，隆昌、龙山等地煌斑岩风化程度相对较弱，稀土元素富集程度相对较低。煌斑岩类风化壳中高度富集轻稀土元素，且以La、Ce、Nd、Pr相对富集为特征。电子探针分析表明，风化煌斑岩类中稀土元素多以稀土独立矿物形式存在，其中以独居石为主。

关键词：稀土元素；富集特征；煌斑岩类；黔东南

中国作为世界第一的稀土资源大国，除了白云鄂博超大型稀土矿床（刘淑春等，1999；汪相，2018）外，更多地稀土资源主要以中—酸性岩体经风化作用形成的风化壳型稀土矿床为主（王登红等，2013；Sanematsu et al.，2013；Maulana et al.，2014；赵芝等，2017a，2017b），其中华南地区是花岗岩风化壳型稀土矿床分布面积最广、储量最大的地区，且富集更为稀缺的重稀土元素而备受关注（吴开兴等，2017；Xu Cheng et al.，2017）。然而，风化壳型稀土资源近年来消耗严重，资源储备降幅明显，因此，寻找新的稀土资源就显得尤为重要。相比而言，针对基性—超基性岩体及其风化壳中稀土富集成矿的调查研究工作重视程度较低，已有文献记录更多地集中在峨眉山玄武岩风化壳型稀土矿床（Yang Ruidong et al.，2008；Zhou Lingjie et al.，2013）及超基性岩红土型稀土、镍等元素表生迁移行为及成矿（付伟等，2010，2014）。煌斑岩类作为一种非常重要的基性—超基性岩，是研究岩石圈地幔性质及演化的重要载体（路凤香等，1991；Fritschle et al.，2013；Prelevic et al.，2013），且因其与金矿（Taylor et al.，1994；黄智龙等，1996；涂怀奎，2000）、金刚石矿（Hunt et al.，2012；Hutchison et al.，2018）之间密切的成因关系，也是地质学家关注的焦点。纵观已有资料，关于煌斑岩类及其风化壳中稀土元素富集成矿的研究较少，其原因可能是煌斑岩类一般出露面积或规模相对较小，且稀土元素含量一般比较低（相对稀土元素矿床）（张连昌等，1998；Roex et al.，2013），岩体及其风化壳中很难高度富集稀土元素或成矿，因此，长期未被作为寻找稀土元素矿床的主要对象，使得与之相关的稀土富集成矿研究程度偏低。然而，通过对贵州东南部麻江一带风化煌斑岩类开展稀土元素测试分析，发现其ΣREE+Y介于$558.78\times10^{-6}\sim2409.94\times10^{-6}$之间，平均$1461.21\times10^{-6}$（高军波等，2018），且贵州东南部分布大量规模不等的煌斑岩类，其中不乏马坪、白坟等规模较大的岩体，很可能具备形成稀土元素矿床的潜力。

已有调查和研究工作表明，黔东南镇远、麻江、

注：本文为贵州省教育厅青年科技人才成长项目（编号：黔教合KY字［2016］117）、贵州省沉积矿床科技创新人才团队项目（编号：黔科合平台人才［2018］5613）、国家自然科学基金资助项目（编号：U1812402）、贵州省科技计划资助项目（编号：黔科合基础［2019］1315）和贵州省人才基地项目（编号：RCJD2018-21）的成果。
收稿日期：2018-10-06；改回日期：2019-06-15；责任编辑：章雨旭。Doi：10.16509/j.georeview.2019.04.011
作者简介：杨光海，男，1993年生，在读硕士研究生，从事三稀矿产资源研究；Email：yangguanghai1993@126.com。通讯作者：高军波，男，1985年生，博士，副教授，硕士生导师，从事沉积矿床研究和教学工作；Email：gaojunbo1985@126.com。

施秉、雷山等地广泛出露煌斑岩类岩体,岩体常以岩墙、岩床及岩脉等形式产出(任怀翔等, 1993; 杨光忠, 2019),区内煌斑岩类具有典型的煌斑结构,块状构造,斑晶以橄榄石假象、云母、辉石等为主,基质以细粒云母、透长石、钛铁矿、锐钛铁矿、磷灰石、锆石等为主,并含有尖晶石、钾镁闪石等特征矿物(江万, 1995 ; 陈慧等, 2018),结合岩体高度富集不相容元素及轻稀土元素等特征,并与澳大利亚富含金刚石的典型钾镁煌斑岩对比,将其定名为钾镁煌斑岩(罗会文等, 1994; 任怀翔等, 1993; 杨光忠, 2018; 陈慧等, 2018)。然而,关于煌斑岩及其风化壳中稀土元素的研究涉及甚少,为了弄清贵州东南部煌斑岩类及其风化壳中稀土元素富集特征及成矿潜力,本文以黔东南风化煌斑岩类分布较广的麻江地区为例,通过对煌斑岩类风化壳中稀土元素富集地质特征及赋存状态研究,以期为煌斑岩类及其风化壳中稀土元素富集规律研究提供参考。

1 区域地质背景

贵州省大地构造上属于羌塘—扬子—华南板块(I 级构造分区)及之扬子陆块(II 级构造分区)(贵州省地质调查院. 2017)。研究区处于江南造山带西南段的北亚段(图 1a)(戴传固等, 2005),北西侧为扬子陆块,南东部为华夏陆块主体,属于扬子陆块与华夏陆块之间的碰撞造山带(程裕淇, 1994; 戴传固等, 2005)。由于研究区处于江南造山构造活动带,区内构造样式复杂,随着扬子古陆与华夏古陆曾发生碰撞汇聚、裂解、再聚合进入华南造山等多阶段构造演化(王砚耕, 1996; 戴传固等, 2005, 2010),主要经历武陵、加里东、海西—燕山及喜马拉雅等构造运动,形成现今多期构造叠加的复杂构造格局。研究区最老地层为中-新元古界的青白口系,岩石出露以青白口系下江群浅变质岩和寒武系碳酸盐岩为主,并发育一套偏碱性超基性-基性煌

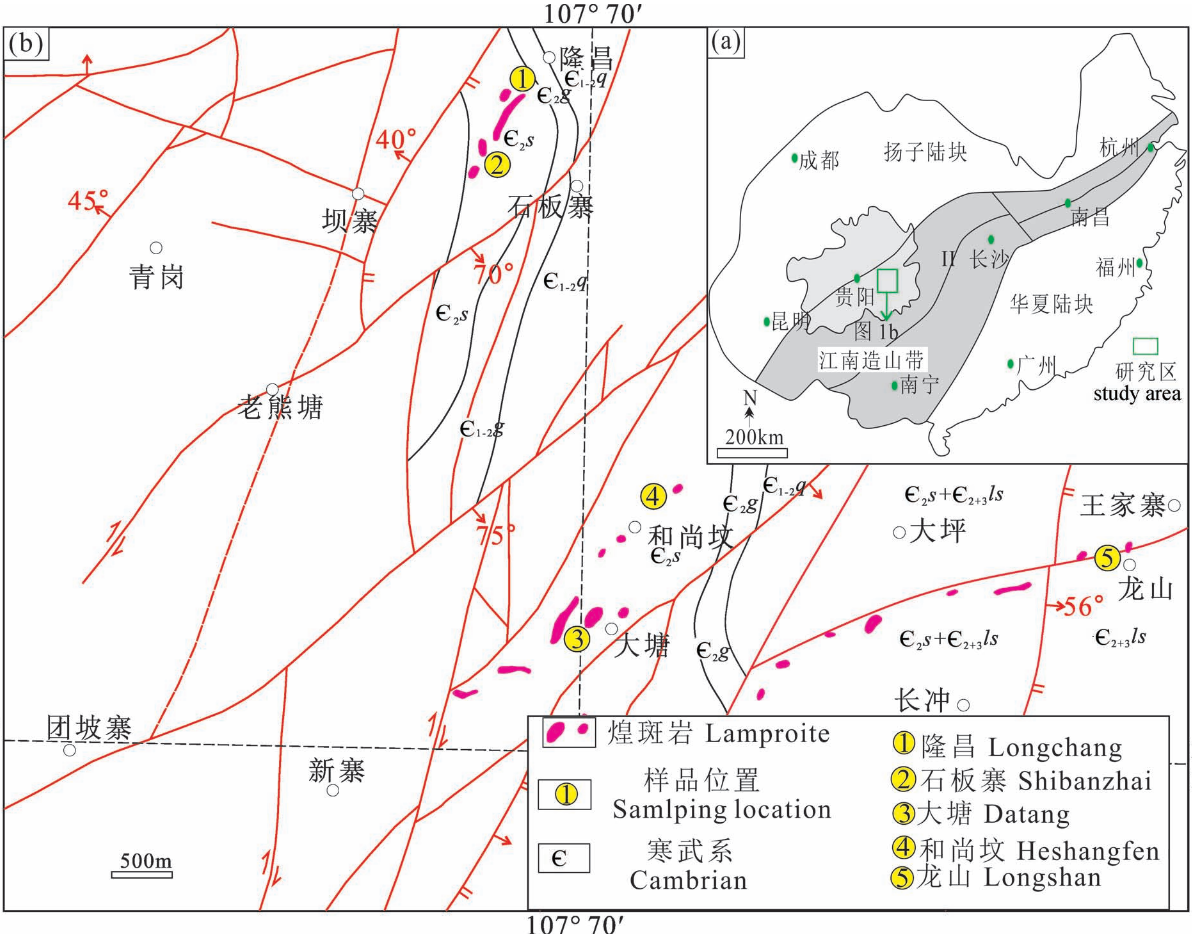

图 1 (a) 华南大陆地区大地构造简图(据程裕淇, 1994 修改); (b) 黔东南麻江区域地质简图、岩体分布和采样位置

Fig. 1 (a) Geo-tectonic sketch map of southeastern China continent (modified after Cheng Yuqi, 1994#); (b) Sketch map showing regional geology, distribution of lamproite and sampling location in Majiang, southeastern Guizhou

斑岩类(贵州省地质调查院, 2017)。

贵州东南部主要发育施洞口和施秉—镇远交汇于镇远地区两条深大岩石圈断裂(贵州省地质调查院, 2017),并为该区偏碱性超基性-基性煌斑岩类的侵入提供运移通道,控制区内煌斑岩类的空间展布,局部岩体分布呈带状(杨光忠等, 2019),岩体主要以岩管、岩墙、岩脉等形式(任怀翔等,1993;杨光忠, 2019)直接侵位于寒武系碳酸盐岩地层。如麻江一带煌斑岩类主要围绕三都-凯里区域性断裂两侧产出(陈慧等, 2018),主要以岩墙、岩管、岩床等形式侵位于寒武系高台组、娄山关组及石冷水组等地层的碳酸盐岩中 (杨松平,1998),岩体普遍遭受不同程度的风化和蚀变。

2 采样与测试分析

2.1 样品特征

对黔东南麻江隆昌、龙山、大塘、石板寨及和尚坟煌斑岩类进行调查发现,区内风化煌斑岩类出露条件良好(图 2a—c),岩体多直接穿插或侵入寒武系石冷水组白云岩中,与围岩接触界线明显,围岩接触带常见质地坚硬深褐色褐铁矿化层及白云岩捕掳体,围岩具微弱烘烤蚀变现象。区内煌斑岩类岩体多呈岩墙、岩脉等形式产出,岩体出露规模相对较小,遭受风化作用强烈(图 2d—j),难以保存未风化煌斑岩类。

隆昌、龙山、大塘等地岩体风化程度较为接近,岩石多为块状,岩体风化程度相对较弱,具有块状构造(图 2d—f),颜色为浅黄色或浅黄绿色,表面局部风化强烈成灰白色土状(图 2d),褐铁矿化明显,以条带状或团块为主(图 2d—e),具典型斑状结构(图 3a),斑晶以金云母、橄榄石假象为主(图 3a—b),基质以细粒云母、磷灰石、金红石等矿物为主,早期结晶的橄榄石、辉石等矿物已蚀变,如滑石化(图 3c)。且岩体含较多粗粒状异源角砾,其成分多为白云岩角砾,因风化而呈浅黄色(图 2f)。石板寨与和尚坟煌斑岩等地煌斑岩类风化相对较强,岩石硬度很低,为软块状甚至松散土状,呈土黄色、暗灰色,具斑状结构,斑晶以粗粒云母类矿物为主(图 2g—i),基质可见细粒云母、磷灰石等(图 3d)。煌斑岩类因风化作用形成较多黏土级矿物 (图 2g—i)。诚然,麻江地区煌斑类岩体普遍强烈风化,多呈土黄色、黄褐色,难以见到弱风化岩体。但邻区镇远一带仍保存有弱风化煌斑岩类,呈灰绿色,具有块状构造 (图 2j),为典型煌斑岩类特征。且已有研究资料显示,麻江地区产出的煌斑岩类具典型煌斑结构,斑晶以橄榄石、辉石、云母为主,基质常见透长石、磷灰石、碱镁闪石、金红石等(陈慧等, 2018),橄榄石、辉石等易蚀变矿物蛇纹石化、滑石化、绿泥石化及碳酸盐化较为严重(任怀翔等, 1993; 陈慧等, 2018),综合其岩石学、矿物学及地球化学特征,认为区内岩体应为橄榄钾镁煌斑岩 (任怀翔等, 1993; 杨松平, 1998; 陈慧等, 2018)。

由于受岩体出露规模小、岩体风化程度普遍高等因素限制,难以实现对同一岩体展开基岩—弱风化—强风化煌斑岩连续对比研究。为此,本文选取麻江地区 5 个典型煌斑岩类岩体展开岩石学和地球化学研究,初步探讨煌斑岩类风化壳中稀土元素富集特征。共采集代表性样品 20 件,其中隆昌 5 件、龙山 5 件、大塘 4 件、石板寨 4 件及和尚坟 2 件。

2.2 测试方法

20 件风化煌斑岩类样品主量及稀土元素测试在澳实分析测试(广州)有限公司完成。主量元素测试:首先在制备 200 目粉末样品中加入 $Li_2B_4O_7$—$LiBO_2$助熔物,充分混合后置于 1000℃条件下熔融,冷却后加稀 HNO_3和稀 HCl 溶解,然后采用 (ME-XRF26s)方法进行测试。稀土元素测试:首先将磨制 200 目粉末样品用 HF+HNO_3进行密封溶解,再添加 Rh 内标准溶液后转化成为 1% HNO_3溶液介质并用以 (ICP-MS)进行测定,分析仪器为 PE Elan6000 型电感耦合等离子质谱计,相对误差低于 5%。

电子探针分析在西安地质矿产研究所完成,首先将岩石样品磨制成薄片,表面喷镀导电碳质薄膜,然后选用日本 (JEOL) 电子公司生产的 JXA-8100 型电子探针仪进行高倍放大观察,利用电子探针背散射图像(BSE)分析微区矿物特征,结合能谱分析辨别样品微分区矿物类型。实验条件电压 15KV、电流 10nA 及成分分析直径束斑 1 μm。

2.3 测试结果

20 件风化煌斑岩类主量元素分析结果列于表 1,其中 SiO_2含量介于 26.48%~54.97%,属于超基性—基性岩浆岩范畴,与国内外绝大部分煌斑岩类 SiO_2含量 (Hwang et al., 1994; Srivastava et al., 2007;王玉峰等, 2019) 相近。麻江风化煌斑岩类中 K_2O = 0.09% ~ 5.58%(平均 1.99%)、Na_2O = 0.04%~0.14%(平均 0.08 %),$K_2O/Na_2O>3$, 具有典型钾镁煌斑岩类中钾、钠元素比值特征,且风化煌斑岩类中 Ti 含量(TiO_2=2.49%~10.00%)比西澳

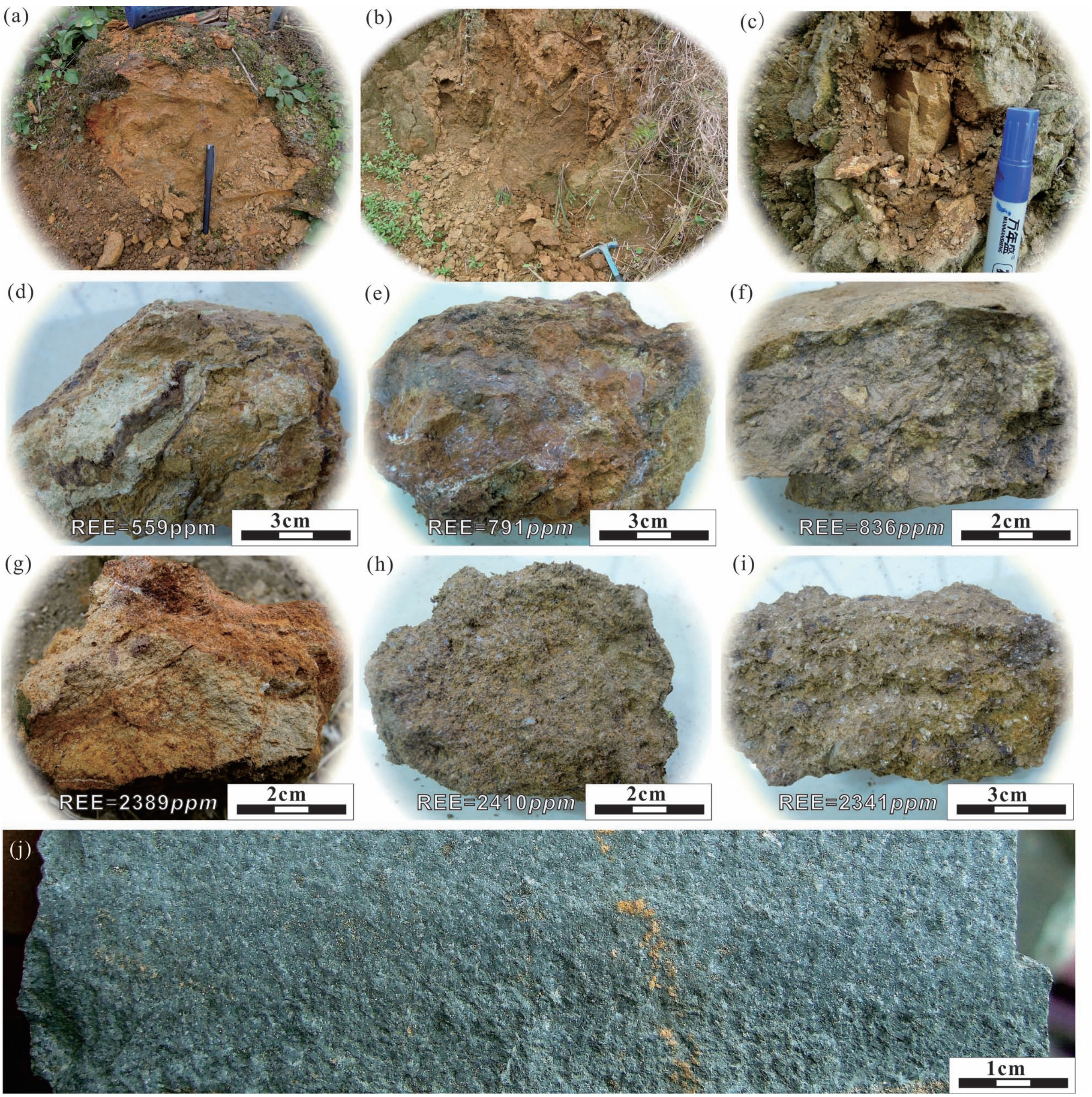

图 2 黔东南麻江风化煌斑岩类野外及样品特征

Fig. 2 Field and samples characteristics of weathered lamproite in Majiang, Southeastern Guizhou

(a) 龙山风化煌斑岩露头; (b) 大塘风化煌斑岩露头; (c) 和尚坟风化煌斑岩露头; (d) 隆昌块状风化煌斑岩,发育条带状褐铁矿化; (e) 隆昌块状风化煌斑岩, 表面褐铁矿化明显; (f) 隆昌块状风化煌斑岩, 含白云岩角砾; (g) 和尚坟松散状风化煌斑岩类; (h) 石板寨松散状风化煌斑岩, 含少量云母; (i) 石板寨松散状风化煌斑岩, 含少量云母矿物; (j) 灰绿色致密状煌斑岩

(a) The outcrop of weathered lamproite in Longshan; (b) the outcrop of weathered lamproite in Datang; (c) the outcrop of weathered lamproite in Heshangfen; (d) bulk weathered lamproite sample with a long strip limonite(black) from Longshan; (e) limonite alteration are obviously occured in surface of bulk weathered lamproite sample from Longchang; (f) bulk weathered lamproite sample contains a few dolomitic breccia grains from Longchang; (g) loose weathered lamproite sample from Heshangfen; (h) loose weathered lamproite sample contains a few mica grains from Shibanzhai; (i) loose weathered lamproite sample contains some mica grains from Shibanzhai; (j) greyish-green bulk lamproite

典型钾镁煌斑岩(Hwang et al., 1994)及湖南锡矿山煌斑岩中 Ti 含量(胡阿香等, 2016)偏高,暗示原岩中钛含量较高,属高钛煌斑岩类。麻江风化煌斑岩类因在表生风化作用过程中 Na、K 等元素大量流失,其含量偏低。而 Fe、Al 因在表生风化作用阶段较为稳定,风化煌斑岩类中 Fe_2O_3、Al_2O_3 含量往往偏高,分别为 Fe_2O_3 = 13.20% ~ 33.29%, Al_2O_3 = 4.94%~17.43%,其中隆昌风化煌斑岩类褐铁矿化尤其明显(图 2d、e)(表 1)。

麻江 20 件风化煌斑岩类中稀土元素普遍富集(表 2),REE+Y 介于 558.78×10^{-6} ~ 2409.94×10^{-6}(平均 1461.21×10^{-6}),远高于山东、辽宁等地钾镁煌斑岩及金伯利岩(REE = 300.00×10^{-6} ~ 600.00×10^{-6})(周秀忠等, 1990),比澳大利亚西部 Yilgarn 地块钾镁煌斑岩类(ΣREE = 346.19×10^{-6} ~ 1566.13×10^{-6}, 平均 868.79×10^{-6}, n = 15)(Fraser et al., 1985)略高,但低于澳大利亚西部 Ellendale 金伯利岩(REE = 1280.95×10^{-6} ~ 3074.28×10^{-6}, n = 7)及钾镁煌斑岩中(ΣREE = 1408 ~ 5120×10^{-6}, n = 21)(McCulloch et al., 1983)。可见,风化煌斑岩类稀土元素高度富集不仅只分布于麻江地区,澳大利亚西部典型钾镁煌斑岩类也发育稀土元素高度富集。因此,煌斑岩类,特别是其风化壳中具有形成稀土元素矿床的地质条件和资源潜力。

3 讨论

3.1 风化煌斑岩类稀土元素富集特征

对麻江隆昌、龙山、大塘、石板寨及和尚坟不同风化煌斑岩类地质特征及其稀土元素含量分析发现,隆昌煌斑岩类风化程度相对弱,块状构造、见碳酸盐岩角砾,岩体褐铁矿化明显,呈条带状或团块(图 2d、e),其 *CIA* 值相对偏低(73~77),因其褐铁矿化较为严重,其 Fe 和 Al 含量异常偏高(表 1)。斑晶主要有金云母、橄榄石假象、铁质团块、不规则角砾等,基质组分主要为细粒云母、磷灰石及风化过程形成的黏土级矿物(细小难以分辨)等,REE+Y 平均 1038.15×10^{-6}。龙山与隆昌煌斑岩类风化壳岩石特征及矿物组成基本类似,区别在于龙山煌斑岩

表 1 黔东南麻江风化煌斑岩类主量元素测试结果(%)

Table1 Major element compositions of the weathered lamproite samples from Majiang, Southeastern Guizhou (%)

采样位置	样品编号	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	SiO_2	SO_3	TiO_2	烧失	*CIA*
隆昌	LC01	13.34	0.26	33.29	3.69	0.89	0.02	0.04	1.71	26.48	0.05	10.00	8.49	77
	LC02	14.50	5.31	25.55	4.10	1.54	<0.01	0.05	4.04	26.65	0.03	9.19	7.38	76
	LC03	13.20	3.59	19.11	3.89	1.43	0.01	0.05	3.06	41.73	0.04	6.25	6.38	75
	LC04	14.29	4.59	23.06	3.99	1.53	0.01	0.05	3.99	31.56	0.03	7.98	7.29	76
	LC05	17.43	3.03	16.78	5.85	0.79	<0.01	0.06	10.20	30.85	0.05	6.35	7.28	73
龙山	LS01	9.27	0.16	29.28	2.68	1.08	<0.01	0.05	4.05	40.42	0.02	5.47	5.93	76
	LS02	9.70	0.16	25.71	2.90	1.10	0.01	0.06	3.77	42.97	0.02	6.06	6.23	75
	LS03	8.79	0.14	39.92	2.51	0.96	<0.01	0.06	2.41	31.53	0.21	5.87	5.71	76
	LS04	8.72	0.85	42.42	2.51	0.91	0.01	0.07	9.90	17.51	0.42	5.03	10.56	75
	LS05	12.51	2.32	16.18	2.59	2.21	0.07	0.08	1.41	44.09	1.15	5.24	11.56	80
大塘	DT02	4.94	15.25	13.20	0.29	9.91	0.05	0.14	2.06	26.65	0.05	3.89	22.62	86
	DT04	16.11	1.62	19.89	0.60	7.97	0.16	0.10	1.56	36.49	0.04	2.49	12.02	94
	DT05	6.76	2.92	15.04	0.09	17.05	0.18	0.13	2.45	41.53	0.01	4.35	8.47	93
	DT06	6.26	1.82	19.05	0.10	16.75	0.18	0.13	1.41	41.36	0.02	3.60	8.51	92
石板寨	SBZ01	8.73	3.95	14.42	0.68	11.10	0.12	0.12	2.66	43.20	0.03	6.39	7.62	89
	SBZ02	6.66	4.09	15.22	0.24	9.95	0.02	0.09	2.92	43.88	1.1	6.46	7.31	92
	SBZ03	7.03	5.15	14.25	0.13	12.55	0.18	0.13	3.09	41.06	0.06	6.83	7.91	93
	SBZ04	7.35	4.30	18.63	0.35	9.68	0.08	0.11	2.96	40.39	0.04	7.13	7.55	91
和尚坟	HSF01	8.38	0.16	17.25	1.47	1.58	0.01	0.04	1.97	54.97	0.34	6.23	6.62	83
	HSF02	8.45	3.05	16.28	1.07	3.13	0.25	0.07	2.96	50.83	0.07	6.24	6.21	86

注:$CIA = \frac{n(Al_2O_3)\times100}{n(Al_2O_3)+n(CaO^*)+n(Na_2O)+n(K_2O)}$, 式中 CaO^* 只包括硅酸岩中的 CaO。$n(CaO^*)_{计算} = n(CaO)_{测试} - \frac{5}{3}n(P_2O_5)_{测试}$, 计算后的 $n(CaO^*)_{计算}$ 如果高于 $n(Na_2O)_{测试}$,则 $n(CaO^*) = n(Na_2O)_{测试}$, 若 $n(CaO^*)$ 计算低于 $n(Na_2O)_{测试}$,则 $n(CaO^*) = n(CaO*)$ 计算。

类风化程度更深,多呈浅土黄色,其稀土元素含量较昌隆风化煌斑岩略高,REE+Y 平均 1079.40×10^{-6}。大塘煌斑岩类较隆昌、龙山等地风化程度强,黏土级矿物含量明显增多,褐铁矿化不明显,REE+Y 平均 1382.37×10^{-6}。石板寨与和尚坟煌斑岩类风化程度强,呈松散土状,矿物组成有云母蚀变假象、磷灰石及风化黏土级矿物等,且云母蚀变假象、磷灰石等矿物含量相对较高(图 3d),其稀土元素高度富集,REE+Y 平均分别高达 2140.29×10^{-6} 和 2272.93×10^{-6},远高于隆昌、龙山等地风化煌斑岩类中稀土元素含量。麻江隆昌、龙山、大塘、石板寨及和尚坟风化煌斑岩类岩石特征、风化指数(*CIA*)及其稀土富集含量(REE+Y)显示,隆昌、龙山等地煌斑岩类风化程度(*CIA*=73~80)低于石板寨、和尚坟煌斑岩类风化程度(*CIA*=83~94),其风化壳中稀土元素富集程度也远低于石板寨、和尚坟等地煌斑岩类风化壳,展现出煌斑岩类风化程度越高(*CIA* 值偏大),富集的稀土元素含量越高。综上,基于麻江地区不同出露点风化煌斑岩类宏观地质特征、*CIA* 值及稀土元素地球化学数据,煌斑岩类风化壳中稀土元素含量与岩体风化程度呈正相关性。

麻江隆昌、龙山、大塘、石板寨及和尚坟风化煌斑岩类稀土元素球粒陨石标准化配分模式图显示(图 4),轻稀土元素(LREE)显著富集、重稀土元素(HREE)相对亏损,与甘肃柳园煌斑岩类(刘畅等,2006)、鲁西煌斑岩类中(邱检生等, 1997)及澳大利

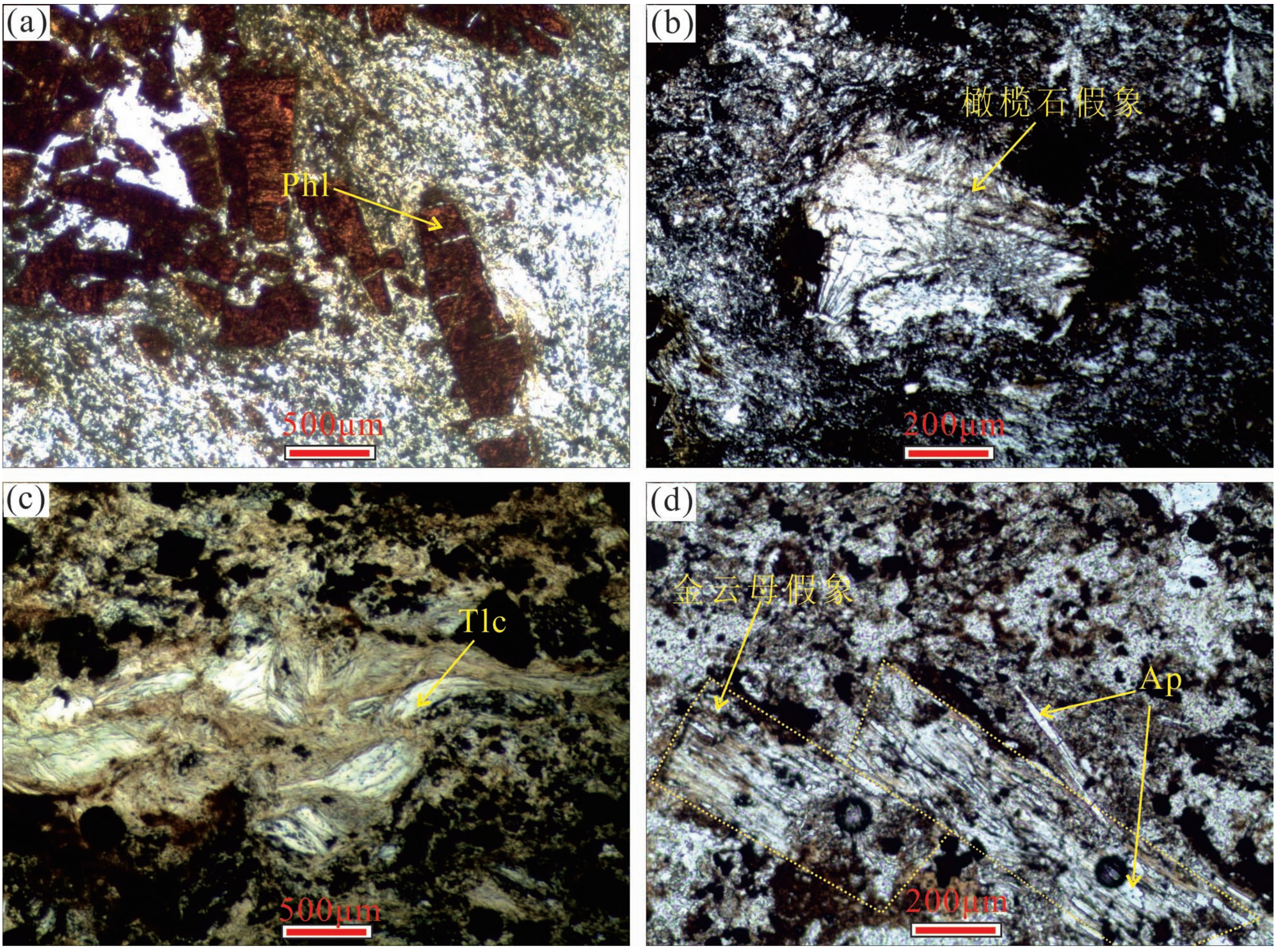

图 3 黔东南麻江风化煌斑岩类显微(单偏光)照片

Fig. 3 Micrographs(single polarized) of weathered lamproite in Majiang, Southeastern Guizhou

(a) 风化相对弱的煌斑岩镜下结构,金云母(Phl)具自形—半自形结构, d=200~1000 μm; (b)橄榄石假象斑晶; (c)滑石; (d) 强风化煌斑岩类镜下结构, 自形金云母假象斑晶及长柱状磷灰石; Phl—金云母; AP—磷灰石; Tlc—滑石

(a) Microimage showing texture of weakly weathered lamproite, the euhedral to subhedral phlogopitc grains range from 200 μm to 1000 μm in size; (b) pseudomorph of olivine grains; (c) talc; (d) microimage showing texture of extensively weathered lamproite. The euhedral pseudomorph of phlogopites grains and elongated apatite grains; Phl—phlogopitc; AP—apatite; Tlc—talc

表 2 黔东南麻江风化煌斑岩类稀土元素测试结果($×10^{-6}$)及特征参数

Table 2 The rare earth element compositions ($×10^{-6}$) and characteristic parameters of the weathered lamprophyre samples from Majiang, Southeastern Guizhou

采样位置	样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	LREE	HREE	ΣREE	ΣREE+Y	LREE/HREE	La_N/Yb_N	Eu/Eu*	Ce/Ce*
隆昌	LC01	246	499	53.8	194.5	32.3	8.98	20.30	2.71	14.15	2.34	5.76	0.72	4.15	0.59	69.3	1034.58	50.72	1085.30	1154.60	20.40	40.06	1.00	0.98
	LC02	327	625	67.9	243	37.1	9.05	24.20	3.07	15.50	2.84	6.68	0.79	4.26	0.60	75.4	1309.05	57.94	1366.99	1442.39	22.59	51.87	0.87	0.94
	LC03	152.5	322	37.8	150	30.4	7.38	21.80	2.91	14.65	2.85	7.14	1.03	5.74	0.84	78.5	700.08	56.96	757.04	835.54	12.29	17.95	0.84	0.97
	LC04	170.5	377	44.4	179	35.6	8.85	25.40	3.29	17.25	3.27	7.97	1.06	5.93	0.85	86.6	815.35	65.02	880.37	966.97	12.54	19.43	0.86	1.00
	LC05	138	317	38.8	154.5	30.4	7.55	20.00	2.60	12.55	2.22	5.38	0.70	3.67	0.50	57.4	686.25	47.62	733.87	791.27	14.41	25.41	0.88	1.00
龙山	LS1	216	451	50.0	185.5	31.6	8.15	19.80	2.46	11.10	1.98	4.41	0.56	3.13	0.42	46.7	942.25	43.86	986.11	1032.81	21.48	46.63	0.93	0.99
	LS2	325	649	69.0	242	37.2	8.63	20.90	2.50	11.50	2.02	4.47	0.56	3.07	0.41	47.2	1330.83	45.43	1376.26	1423.46	29.29	71.54	0.87	0.98
	LS3	263	521	53.7	182	25.8	6.06	14.25	1.92	10.10	1.87	4.48	0.58	3.20	0.45	46.1	1051.56	36.85	1088.41	1134.51	28.54	55.54	0.88	0.98
	LS4	97.9	208	24.9	102	21.8	6.13	16.85	2.40	12.10	2.21	4.97	0.63	3.43	0.46	55.0	460.73	43.05	503.78	558.78	10.70	19.29	0.94	0.97
	LS5	282	559	57.7	203	31.9	7.40	19.00	2.63	12.75	2.38	5.71	0.76	4.38	0.62	58.2	1141.00	48.23	1189.23	1247.43	23.66	43.51	0.85	0.98
大塘	DT02	337	632	67.7	235	33.9	7.92	19.50	2.35	10.55	1.77	3.83	0.43	2.46	0.33	43.7	1313.52	41.22	1354.74	1398.44	31.87	92.57	0.87	0.94
	DT04	327	615	67.4	247	42.1	9.76	27.50	3.37	16.20	2.95	6.97	0.88	5.16	0.71	74.6	1308.26	63.74	1372.00	1446.60	20.52	42.82	0.82	0.93
	DT05	337	628	67.2	235	36.0	9.13	21.90	2.56	11.60	1.94	3.98	0.50	2.69	0.35	47.6	1312.33	45.52	1357.85	1405.45	28.83	84.66	0.92	0.93
	DT06	310	568	61.5	216	31.9	6.97	18.85	2.28	10.25	1.80	3.95	0.48	2.55	0.35	44.1	1194.37	40.51	1234.88	1278.98	29.48	82.15	0.80	0.92
石板寨	SBZ01	471	887	93.4	325	49.1	12.35	29.10	3.37	15.50	2.59	5.67	0.69	3.54	0.46	63.0	1837.85	60.92	1898.77	1961.77	30.17	89.91	0.92	0.94
	SBZ02	448	832	88.0	309	45.5	10.35	27.10	3.14	14.25	2.33	5.07	0.60	3.38	0.45	59.7	1732.85	56.32	1789.17	1848.87	30.77	89.57	0.83	0.93
	SBZ03	602	1095	114.0	392	56.3	13.75	32.10	3.78	17.15	2.84	6.33	0.73	3.94	0.52	69.5	2273.05	67.39	2340.44	2409.94	33.73	103.3	0.91	0.93
	SBZ04	572	1065	111.0	382	55.7	13.50	33.40	3.84	17.45	2.94	6.65	0.77	4.08	0.55	71.7	2199.20	69.68	2268.88	2340.58	31.56	94.74	0.89	0.94
和尚坟	HSF01	583	1105	116.0	397	53.9	11.75	28.10	3.60	17.10	2.73	5.96	0.74	4.27	0.51	59.6	2266.65	63.01	2329.66	2389.26	35.97	92.26	0.83	0.95
	HSF02	499	981	103.5	368	54.7	12.90	31.60	3.60	16.90	2.93	6.09	0.75	4.01	0.52	71.1	2019.10	66.40	2085.50	2156.60	30.41	84.09	0.87	0.97

注：LREE=La+Ce+Pr+Nd+Sm+Eu；HREE=Gd+Tb+Dy+Ho+Er+Tm+Yb+Lu；ΣREE=LREE+HREE。

亚西部煌斑岩(Fraser et al., 1985)较为类似。麻江风化岩体轻重稀土元素比值(LREE/HREE)介于 12.29～35.59，La_N/Yb_N值介于 17.95～103.25，显示轻重稀土元素高度分异。麻江风化煌斑岩类中轻稀土元素(LREE)介于 $460.73×10^{-6}$～$2273.05×10^{-6}$，重稀土元素(HREE)介于 $36.85×10^{-6}$～$69.68×10^{-6}$，高度富集轻稀土元素，且稀土元素含量远高于其它地区煌斑岩类中稀土元素含量(邱检生等，1997；张连昌等，1998；胡阿香等，2016)，与澳大利亚西部金伯利岩和典型钾镁煌斑岩中稀土元素(McCulloch et al., 1983；Fraser et al., 1985)类似，具有高度富集形成稀土元素矿床的潜力。

麻江地区不同风化程度煌斑岩类中均富集轻稀土元素 La、Ce、Nd、Pr 和重稀土元素 Y，其中 La 介于 $97.90×10^{-6}$～$602×10^{-6}$，平均 $335.2×10^{-6}$；Ce 介于 $208×10^{-6}$～$1105×10^{-6}$，平均 $647×10^{-6}$；Nd 介于 $102×10^{-6}$～$397×10^{-6}$，平均 $247.08×10^{-6}$；Pr 介于 $24.9×10^{-6}$～$116×10^{-6}$，平均 $69.4×10^{-6}$。La、Ce、Nd、Pr 总平均含量高达 $1298×10^{-6}$，占 LREE 总含量 96%，占 ΣREE 总含量 92.75%，并呈现 Ce>La>Nd>Pr 的富集规律，与加拿大魁北克拉克斯煌斑岩类中轻稀土富集(Ce>Nd>La)(Bourne et al., 1991)特征略有不同。重稀土元素 Y 相对富集，全岩 Y 含量介于 $43.7×10^{-6}$～$86.60×10^{-6}$，平均 $61.25×10^{-6}$，与大容山—十万大山花岗岩带广西段花岗岩风化壳中 Y 含量(平均 $86×10^{-6}$)(赵芝等，2017a)相近。然而，该区风化煌斑岩类中重稀土元素 Y 在稀土元素富集程度

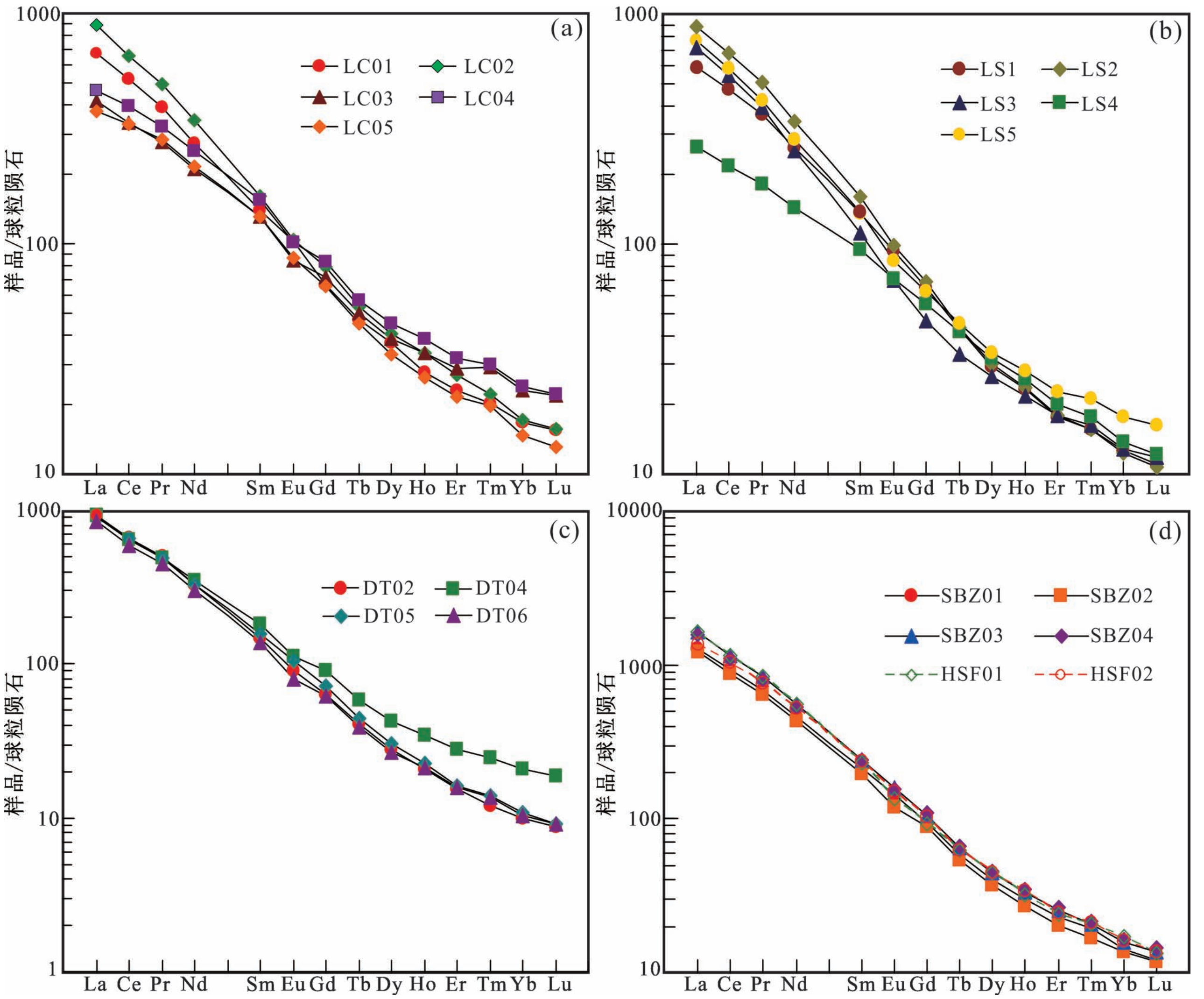

图 4 黔东南麻江风化煌斑岩类稀土元素标准化配分模式图(球粒陨石数据用引自 Taylor et al., 1985)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of the weathered lamproite in Majiang, Southeastern Guizhou (chondrite data are from Taylor et al., 1985)

(a)隆昌;(b) 龙山;(c) 大塘;(d) 石板寨及和尚坟

(a) Longchang;(b) Longshan;(c) Datang;(d)Shibanzhai and Heshangfen

不同的岩体中所占比例无规律性变化,与滇西土官寨离子吸附型稀土矿床中 Y 配分特征(稀土元素越富集,Y 所占比例越大)(张彬等, 2018)不同,指示风化煌斑岩类中重稀土元素 Y 的迁移富集与稀土元素富集程度无明显相关性。

3.2　风化煌斑岩类中稀土元素赋存状态

稀土元素常常以离子吸附、类质同象、独立矿物等形式赋存(池汝安等, 2007; 张恋等, 2015)。例如白云鄂博超大型稀土矿床中稀土组分常以独立矿物独居石、氟碳铈矿的形式与磁铁矿或萤石共生产出(罗明标等, 2007)。华南花岗岩风化壳型稀土元素矿床中稀土组分多以离子吸附形式赋存(Chi Ru'an et al., 2005)。

电子探针分析发现,麻江风化煌斑岩类中稀土元素多以稀土独立矿物—独居石的形式赋存 (图 5),多呈星点状(图 5a—b)或片状(图 5c—f)分布于绿泥石、金红石等矿物中或其边缘裂隙,形态不规则,粒径变化大,多在 5~30 μm 之间,与金红石、锆石、磷灰石、褐铁矿等矿物共生产出。磷灰石以长条状及不规则短柱状两种类型呈星点状分布于绿泥石中或呈包含关系(图 5f),多为云母矿物风化析出。磷灰石矿物表面光滑,颗粒粒径变化大,多集中于 5

~40 μm，常与绿泥石、褐铁矿等矿物共生。锆石呈自形—半自形结构零星分布(图 5e)，粒径变化大，粒径主要集中在 10~50 μm 之间。金红石呈星点状分布于绿泥石颗粒中(图 5a，c)，颗粒细小，形态较规则，多成半自形结构，粒径多在 10~20 μm 之间，并与独居石、锆石等矿物共生。风化煌斑岩类中褐铁矿呈半自形(图 5b)及不规则状(图 5f)，半自形颗粒褐铁矿粒径 50 μm 左右，表面光滑，矿物边界

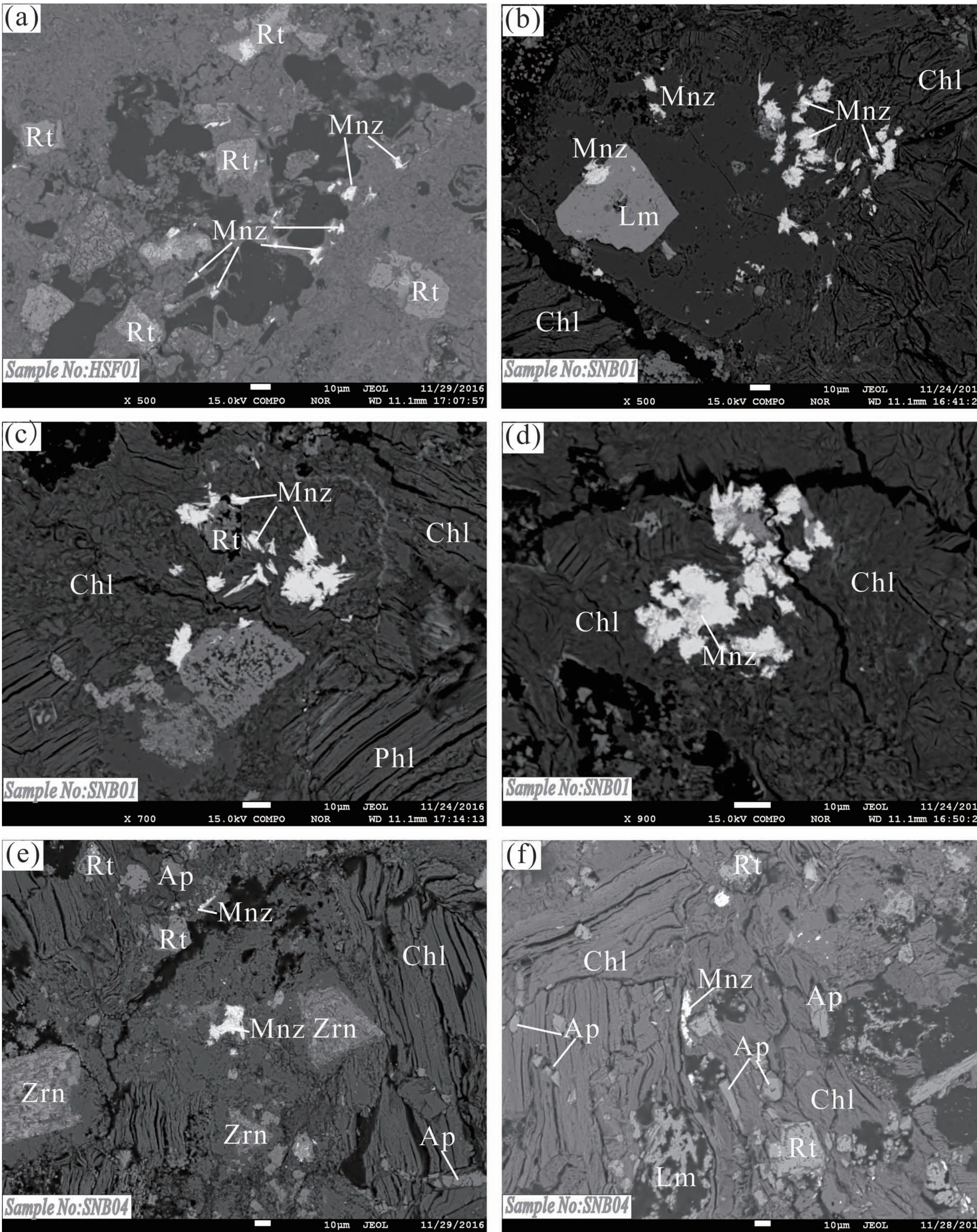

图 5 黔东南麻江风化煌斑岩类中稀土矿物电子探针背散射图

Fig. 5 The BSE images of rare earth mineral of weathered lamproite in Majiang, Southeastern Guizhou

(a) 独居石(Mnz)呈星点状分布于绿泥石(Chl)、金红石(Rt)中;(b) 独居石呈星点状分布于绿泥石(Chl)、褐铁矿(Lm)中;(c) 独居石(Mnz)呈片状分布于绿泥石(Chl)及金红石(Rt)边缘;(d) 独居石(Mnz)呈密集片状分布于绿泥石(Chl)中;(e) 聚片状独居石(Mnz)分布于绿泥石(Chl),与磷灰石、锆石、金红石共生;(f) 独居石呈长条状分布于绿泥石,磷灰石呈长柱状及不规则状分布绿泥石中。Mnz—独居石;Ap—磷灰石;Chl—绿泥石;Rt—金红石;Lm—褐铁矿;Zrn—锆石;Phl—金云母

(a) Scattered monazite(Mnz) are distributed in chlorite(Chl) and rutile(Rt); (b) scattered monazite(Mnz) are distributed in chlorite(Chl) and limonite(Lm); (c) schistose monzite(Mnz) are distributed in chlorite(Chl) and the rutile(Rt) marginal; (d) monzite(Mnz) as concentrated schistose distributed in chlorite(Chl); (e) monazite(Mnz) as schistose distributed in chlorite (Chl) and associated with apatite(Ap), rutile(Rt) and zrcon(Zrn); (f) monazite(Mnz) are distributed in chlorite(Chl) with a long strip. Apatite are distributed in chlorite(Chl) with an elongated or irregular grain. Mnz—monazite; Ap—apatite; Chl—chlorite; Rt—rutile; Lm—limonite; Zrn—zrcon; Phl—phlogopite

清晰(图 5b)。该类褐铁矿可能是原生铁矿物经褐铁矿化而形成。不规则状褐铁矿分布于绿泥石裂隙或其他矿物边缘(图 5f),可能为后期风化过程中褐铁矿化所致。

4　结论

(1) 麻江地区风化煌斑岩类中高度富集稀土元素,REE 介于 $558.78\times10^{-6}\sim2409.94\times10^{-6}$,平均 1461.21×10^{-6},其中 LREE 介于 $460.73\times10^{-6}\sim2273.05\times10^{-6}$,远高于 HREE ($36.85\times10^{-6}\sim69.68\times10^{-6}$)。

(2) 风化煌斑岩类中 LREE/HREE = 12.29~36.59, La_N/Yb_N值介于 17.95~103.25,轻重稀土分异明显,并显著富集轻稀土元素 La、Ce、Nd 和 Pr。

(3) 风化煌斑岩类中稀土元素多以稀土独立矿物形式赋存,独居石可能为稀土元素主要载体。

(4) 黔东南煌斑岩类风化壳中稀土元素的富集与岩体风化程度呈正相关,岩体风化程度越高,稀土元素逾富集。

致谢:论文完成过程中两位审稿专家和责任编辑章雨旭研究员提出了宝贵意见,使得文章得以提升,在此一并表示感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈慧, 严冰, 杨贤明. 2018. 黔东南钾镁煌斑岩岩石学特征. 地质与勘探, 54(4): 702~710.

程裕淇. 1994. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 448~472.

池汝安, 田君. 2007. 风化壳淋积型稀土矿评述. 中国稀土学报, 25(6): 641~650.

戴传固, 李硕, 张慧. 2005. 试论江南造山带西南段构造演化——以黔东及邻区为例. 贵州地质, 22(2): 98~102.

戴传固, 陈建书, 卢定彪, 马会珍, 王雪华. 2010. 黔东南及邻区加里东运动的表现及地质意义. 地质通报, 29(4): 530~534.

付伟, 周永章, 陈远荣, 胡云沪, 陈春南, 牛虎杰, 张志伟, 李小龙. 2010. 东南亚红土镍矿床地质地球化学特征及成因探——以印尼苏拉威西岛 Kolonodale 矿床为例. 地学前缘, 17(2): 127~139.

付伟, 黄小荣, 杨梦力, 雷良奇, 牛虎杰, 长亚倩. 2014. 超基性岩红土风化壳中 REE 地球化学:不同气候风化剖面的对比. 地球科学(中国地质大学学报), (6): 716~732.

高军波, 杨瑞东, 杨光海, 杨光忠, 徐海, 冯康宁. 2018. 贵州东南部煌斑岩类中稀土元素超常富集. 地质论评, 64(5): 1103~1105.

贵州省地质调查院. 2017. 贵州省区域地质志:第 2 版. 北京:地质出版社, 936~1047.

胡阿香, 彭建堂. 2016. 湘中锡矿山中生代煌斑岩及其成因研究. 岩石学报, 32(7): 2041~2056.

黄智龙, 王联魁, 朱成明. 1996. 云南老王寨金矿区煌斑岩的成因:稀土元素研究. 高校地质学报, 2(1): 100~109.

江万. 1995. 贵州东部镇远地区煌斑岩类的矿物学和岩石学研究. 现代地质, 9(3): 351~358

罗会文, 杨光树, 盛学庸. 1994. 我国的第一批含金刚石金云火山岩一为贵州已知的含金刚石岩石正名. 贵州地质, 11(1): 8~24.

罗明标, 杨枝, 郭国林, 李伯平, 刘峰, 刘维. 2007. 白云鄂博铁矿石中稀土的赋存状态研究. 中国稀土学报, 25(增刊): 57~61.

刘畅, 赵泽辉, 郭召杰. 2006. 甘肃北山地区煌斑岩的年代学和地球化学及其壳幔作用过程讨论. 岩石学报, 22(5): 1294~1306.

刘淑春, 章雨旭, 郝梓国, 彭阳. 1999. 白云鄂博赋矿白云岩成因研究历史、问题及新进展. 地质论评, 45(5): 477~486.

路凤香, 韩柱国, 郑建平, 任迎新. 1991. 辽宁复县地区古生代岩石圈地幔特征. 地质科技情报, 10(s1): 2~20.

邱检生, 王德滋, 曾家湖, McInnes B I A. 1997. 鲁西中生代富钾火山岩及煌斑岩微量元素和 Nd—Sr 同位素地球化学. 高校地质学报, 3(4): 384~395.

任怀翔, 张光文. 1993. 贵州麻江金云火山岩(煌斑岩类) 的地质特征. 贵州地质, 10(3): 189~191.

涂怀奎. 2000. 秦岭地区蚀变煌斑岩型金矿的发现及金的预富集研究. 地质论评, 46(5): 543~548.

王登红, 赵芝, 于扬, 赵汀, 李健康, 戴晶晶, 刘新星, 何晗晗. 2013. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方

向. 岩矿测试, 32(5): 796~802.
汪相. 2018. 白云鄂博超大型稀土—铌—铁矿床的成矿时代及成因探析——兼论 P—T 之交生物群灭绝事件和“阿蒙兴造山运动”. 地质论评, 64(2): 299~345.
王砚耕. 1996. 贵州主要地质事件与区域地质特征. 贵州地质, 13(2): 99~104.
王玉峰, 周 军, 王建平, 朱成河, 杨献忠. 2019. 山东省平邑县大井头钾镁煌斑岩地质特征及金刚石含矿性. 地质通报, 38(1): 93~102.
吴开兴, 朱平, 孙涛, 陈陵康, 欧阳怀, 熊锋. 2017. 赣南大埠重稀土矿床矿化富集规律与控矿因素研究. 稀土, 38(2): 1~10.
杨光忠. 2018. 简述贵州施秉下翁哨含铬镁铝榴石和镁铬尖晶石重砂异常之谜. 地质论评, 2018, 64(3): 658~664.
杨光忠, 李永刚, 张与伦, 罗邦良, 黄应均. 2019. 黔东钾镁煌斑岩分布控制因素及其侵位模式. 地质通报, 38(1): 27~35.
杨松平. 1998. 麻江隆昌金云火山岩地质特征及构造控制. 贵州地质, 15(4): 321~330.
赵芝, 王登红, 潘华, 屈文俊. 2017a. 广西某地花岗岩风化壳中稀土元素特征与 REE 矿床成矿机制. 地球科学, 42(10): 1697~1706.
赵芝, 王登红, 陈郑辉, 陈振宇. 2017b. 南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展. 地质学报, 91(12): 2814~2827.
张彬, 马国桃, 高儒东, 曾招金, 汪亮, 左正龙, 黄帅科. 2018. 滇西腾冲—梁河地区土官寨离子吸附型稀土矿床 形成条件及找矿预测. 地球科学, 43(8): 2328~2637.
张恋, 吴开兴, 陈陵康, 朱平, 欧阳怀. 2015. 赣南离子吸附型稀土矿床成矿特征概述. 中国稀土学报, 33(1): 10~17.
张连昌, 卢登蓉, 王淑荣, 梅厚钧. 1998. 山西大同煌斑岩类地质地球化学特征. 岩石矿物, 18(4): 22~30.
周秀仲, 杨建民, 黄蕴慧, 秦淑英. 1990. 山东和辽宁金伯利岩的稀土元素地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 9(4): 301~308.
Bourne J H, Bossé J. 1991. Geochemistry of ultramafic and calc-alkaline lamprophyres from the Lac Shortt area, Quebe. Mineralogy & Petrology, 45(2): 85~103.
Chen Hui, Yan Bing, Yang Xianming. 2018&. Petrological characteristics of the lamproite in Southeastern Guizhou Province. Geology and Exploration, 54(4): 702~710.
Chen Yuqi. 1994#. Introduction to Regional Geology in China. Beijing: Geological Publishing House: 448~472.
Chi Ruan, Tian Jun. 2007&. Review of weathered crust rare earth ore. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 56(6): 641~650.
Chi Ruan, Tian Jun, Li Zhongjun, Peng Cui, Wu Yuanxin, Li Shirong, WangCunwen, Zhou Zhiang. 2005. Existing state and partitioning of rare earth on weathered ores. Journal of Rare Earths, 23(6): 756~759.
Dai Chuangu, Li Shuo, Zhang Hui. 2005&. In itiative discussion on tectonic evolution of Southwest Segment of Jiangnan Orogenic Belt: Taking an example from East Guizhou and the adjacent areas. Guizhou Geology, 22(2): 98~102.
Dai Chuangu, Chen Jianshu, Lu Dingbiao, Ma Huizhen, Wang Xuehua. 2010&. Appearance and geologic significance of Caledonian movement in Southeastern Guizhou, China and its adjacent area. Geological Bulletin of China, 29(4): 530~534.
Fraster K J, Hawkesworth C J, Erlank A J, Mitchell R H, Scott-Smith B H. 1985. Sr, Nd and Pb isotope and minor element geochemistry of lamproites and kimberlites. Earth & Planetary Science Letters, 76(1): 57~70.
Fritschle T, Prelevic D, Foley S F, Jacob D E. 2013. Petrological characterization of the mantle source of Mediterranean lamproites: Indications from major and trace elements of phlogopite. Chemical Geology, 353(5): 267~279.
Fu Wei, Zhou Yongzhang, Chen Yuanrong, Hu Yunhu, Chen Chunnan, Niu Hujie, Zhang Zhiwei, Li Xiaolong. 2010&. Geological and geochemical characteristics of laterite nickel deposit and ore genesis——A case study of Kolonodale in Indonesia Sulawesi, Southeast Asia. Earth Science Frontier, 17(2): 127~139.
Fu Wei, Hu Xiaorong, Yang Mengli, Lei Liangqi, Niu Hujie, Zhang Yaqian. 2014&. REE geochemistry in the laterite crust derived from ultramafic rocks: comparative study of two laterite profiles under differet climate condition. Earth Science, (6): 716~732.
Gao Junbo, Yang Ruidong, Yang Guanghai, Yang Guangzhong, Xu Hai, Feng Kangning. 2018&. Super-enrichment of rare earth element in the lamprophyres from Southeastern Guizhou Province, China. Geological Review, 64(5): 1103~1105.
Guizhou Geological Survey. 2017 #. Regional Geology of Guizhou Province: 2ne edition. Beijing: Geological Publishing House: 936~1047.
Hu Axiang, Peng Jiantang. 2016&. Mesozoic lamprophyre and its origin in the Xikuangshan district, central Hunan. Acta Petrologica Sinica, 32(7): 2041~2056.
Huang Zhilong, Wang Liankui, Zhu Chengming. 1996&. A study on rare earth elements and the genesis of lamproites in Laowangzhai gold deposit area, Yunnan. Geological Journal of Universities, 2(1): 100~109.
Hunt L, Stachel T, Mccandless T E, Armstrong J, Muelenbachs K. 2012. Diamonds and their mineral inclusions from the Renard kimberlites in Quebec. Lithos, 142~143(2012): 267~284.
Hutchison M T. 2018. Diamond exploration and regional prospectivity of Western Australia. Mineralogy & Petrology, 1~17.
Hwang P, Taylor W R, Rocky N M S, Ramsay R R. 1994. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of the Mettersbore No. 1 lamproite pipe, Calwynyardah Field, West Kimberley Province, Western Australia. Mineralogy & Petrology, 51(2~4): 195~226.
Jiang Wan, 1995&. Mineralogical and petrological study on lamproites in Zhenyuan area, Guizhou. Geoscience, 9(3): 351~358.
Lu Fengxiang, Han Zhuguo, Zheng Jianping. 1991&. Characteristics of Paleozoic mantle—lithosphere in Fuxian, Liaoning Province. Geological Science and Technology Information, 10(sl): 2~20.
Luo Huiwen, Yang Guangshu, Sheng Xueyong. 1994&. The first batch of diamond-bearing lamproite in China: Renaming for the known diamond-bearing rock in Guizhou. Guizhou Geology, 11(1): 8~24.
Luo Mingbiao, Yang Zhi, Guo Guolin, Li Boping, Liu Feng, Liu Wei. 2007&. Research on occurrence state of REE in Bayan Obo iron ore. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 25(suppl): 57~61.
Liu Chang, Zhao Zehui, Guo Shaojie. 2006&. Chronology and geochemistry of lamprophyre dykes from Beishan area, Gansu Province and implications for the crust—mantle interaction. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1294~1306.
Liu Shuchun, Zhang Yuxu, Hao Ziguo, Peng Yang. 1999. A genetin study the ore-hosted dolostone in the Bayan Obo deposit—History, problems and New progress. Geological Review, 45(5): 477~486.
Maulana A, Yonezu K, Watanabe K. 2014. Geochemistry of Rare Earth Elements (REE) in the weathered crusts from the granitic rocks in Sulawesi Island, Indonesia. Journal of Earth Science, 25(3): 460~472.
McCulloch M T, Jaques A L, Nelson D R, Lewis J D.1983. Nd and Sr

isotopes in kimberlites and lamproites from Western Australia: an enrich mantle origin. Nature, 302(5907): 400~403.

Prelevic D, Jacob D E, Foley S F. 2013. Recycling plus: A new recipe for the formation of Alpine - Himalayan orogenic mantle lithosphere. Earth & Planetary Sciences Letters, 362(1):187~197.

Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Zeng Jiahu, McInnes B I A. 1997&. Study on trace element and Nd—Sr isotopic geochemistry of Mesozoic potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in Western Shandong Province. Geological Journal of Universities, 3(4): 384~395.

Ren Huaixiang, Zhang Guangwen. 1993&. Geology of the lamproites in Majiang, Guizhou. Guizhou Geology, 10(3): 189~191.

Roex A P L, Bell D R, Davis P. 2003. Petrogenesis of group I kimberlites from Kimberley, South Africa: Evidence from Bulk-rock geochemistry. Journal of Petrology, 44(12): 2261~2286.

Sanematsu K, Murakami H, Watanabe Y, Duangsurigna S, Siphandone V. 2013. Enrichment of rare earth elements (REE) in granitic rocks and their weathered crusts in central and southern Laos. Bulletin of the Geological Survey of Japan, 60(11): 527~558.

Srivastava R K, Rao N V C. 2007. Petrology, geochemistry and tectonic significance of Palaeoproterozoic alkaline lamprophyres from the Jungel Valley, Mahakoshal supracrustal belt, Central India. Mineralogy & Petrology, 89(3~4): 189~215.

Sun Shijun, Yang Songping. 1998&. A discussion on prerequisites to search for primary diamonds in Guizhou. Guizhou Geology, 15(1): 1~8.

Taylor W R, Rock N M S, Groves D I, Perring C S, Gloding S D. 1994. Geochemistry of Archean shoshonitic lamprophyres from the Yilgarn Block, Western Australia: Au abundance and association with gold mineralization. Applied Geochemistry, 9(2): 197~222.

Tu Huaikui. 2000&. Discovery and gold preconcentration study of the lamprophyre alteration type gold deposits in the Qinling Area. Geological Review, 46(5): 543~548.

Xu Cheng, Kynicky J, Smith M P, Kopriva A, Brtnicky M, Urubek T, Yang Yueheng, Zhao Zheng, He Chen, Song Wenlei. 2017. Origin of heavy rare earth mineralization in South China. Nature Communications, 1~8.

Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Zhao Ting, Li Jiankang, Dai Jingjing, Liu Xinxing, He Hanhan. 2013&. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources. Rock and Mineral analysis, 32(5): 796~802.

Wang Xiang. 2018. Analysis on the oreforming time and genesis of the Bayan Obo REE—Nb—Fe deposit: With a discussion on the mass extinction at the P—T boundary and "AMH Orogeny". Geological Review, 64(2): 299~345.

Wang Yangeng. 1996&. Major geo-events and regional features of Guizhou. Guizhou Geology, 13(2): 99~104.

Wang Yufeng, Zhou Jun, Wang JianPing, Zhu Chenhe, Yang Xianzhong. 2019. A discussion on geological characteristics and diamond ore-bearing potentiality of the Dajingtou lamporphite, Pingyi County, Shandong Province. Geological Bulletin of China, 38 (1): 93~102.

Wu Kaixing, Zhu Ping, Sun Tao, Chen Lingkang, Xiong Feng. 2017&. Study on the ore-controlling factors and the mineralization and enrichment features of Dabu HREE deposit, Southern Jiangxi Province. Chinese Rare Earths, 38(2): 1~10.

Yang Songping. 1998&. Geology of lamproites in Longchang, Majiang County Guizhou and their structural control. Guizhou Geology, 15 (4): 321~330.

Yang Guangzhong. 2018&. A brief introduction to the enigma of chromium-bearing-pyrope and magnesia-chrome-spinel placer anomalies in Xiawengshao Area, Shibing County, Guizhou Province. Geological Review, 64(3): 658~664.

Yang Guangzhong, Li Yonggang, Zhang Yulun, Luo Bangliang, Huang Yingjun. 2019&. Distribution-controlling factors and emplacement mode of lamproite in southeastern Guizhou Province. Geological Bulletin of China, 38(1):27~35.

Yang Ruidong, Wang Wei, Zhang Xiaodong, Liu Ling, Wei Huairui, Bao Miao, Wang Jingxin. 2008. A new type of rare earth elements deposit in weathering crust of Permian basalt in western Guizhou, NW China. Journal of Rare Earths, 26(5): 753~759.

Zhao Zhi, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Chen Zhenyu. 2017&. Progress of research on metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in the Nanling range. Acta Geological Sinica, 91(12): 2814~2827.

Zhao Zhi, Wang Denghong, Pan Hua, Qu Wenjun. 2017&. REE geochemistry of a weathering profile in Guangxi, Southern China, and genesis of ion-adsorption type REE deposit. Earth Science, 42 (10): 1697~1706.

Zhang Bing, Ma Guotao, Gao Rudong, Zeng Zhaojin, Wang Liang, Zuo Zhenglong, Huang Shuaike. 2018&. Formation conditions and prospecting prediction of Tuguanzhai ion-adsorption type REE deposit in Tengchong—Lianghe area. Earth Science, 43(8): 2328 ~2637.

Zhang Lian, Wu Kaixing, Chen Lingkang, Zhu Ping, Ou Yanghuai. 2015&. Overview of metallogenic features of ion-adsorption type REE deposits in Southern Jiangxi Province. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 33(1): 10~17.

Zhang Lianchang, Lu Dengrong, Wang Shurong, Mei Houjun. 1998&. Geology and geochemistry of lamproite in Datong area, Shanxi Province. Jounal of Mineralogy and Petrology, 18(4): 22~30.

Zhou Lingjie, Zhang Zhengwei, Li Yujiao, You Fuhua, Wu Chengquan, Zheng Chaofei. 2013. Geological and geochemical characteristics in the paleo-weathering crust sedimentary type REE deposits, western Guizhou, China. Journal of Asian Earth Sciences, 73(5): 184~198.

Zhou Xiuzhong, Yang Jianmin, Huang Yunhui, Qin Shuying. 1990&. REE geochemical characterristics of Kimberlites in Shandong and Liaoning, China. Acta Petrologica et Mineralogica, 9(4): 301~308.

Characteristic and prospecting significance of the rare earth elements enrichment in weathering crust of lamproite, southeastern Guizhou

YANG Guanghai[1)], GAO Junbo[1)], YANG Ruidong[1)], TIAN Yazhou[1)], YANG Guangzhong[2)], XU Hai[1)], FENG Kangning[1)]

1) *College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang*, 550025;

2) *No.* 101 *Geological Bridage, Bureau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, Kaili, Guizhou*, 556000

Objectives: Previous studies has been documented that the lamproite and its weathering crust were considered to be difficult to concentrate or mineralize. However, we analyzed the contents of REE in 20 weathered lamproite samples from Longchang, Longshan, Datang, Shibanzhai and Heshangfen in Majiang area, Southeastern Guizhou Province. The results showed that high contents of rare earth elements (REEs) occur in weathering crust of lamproite. In this paper mainly discusses the characteristic of the rare earth elements enrichment and occurrence in the weathering crust of lamproite in Majiang area, Southestern Guizhou Province.

Methods: All the samples were crashed to 200-mesh for whole-rock geological analyses were performed at ALS Chemex (Guangzhou) Co Ltd., include major, minor and REE elements. Whole-rock abundance of major elements were analyzed by X-ray fluoresscene (XRF) method. Minor and REE elements were analyzed by using a Elan6000 inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Electron microprobe (EMP) analysis: quantitative EMP analyses were performed using a JEOL electron-probe microanalyzer JXA-8100 at the Institute of Geology and Minerals Resources in Xi'an, Shaanxi Province. The instrument was set to operate at an accelerating voltage of 20 kV, 10 nA probe current and 1 μm probe diameter.

Results: The major and rare earth elements composition of the investigated rock samples are shown in table 1 and 2. The ΣREE+Y contents of weathered lamproite range from 558.78×10^{-6} to 2409.94×10^{-6}, with an average of 1461.21×10^{-6}. The average contents of LREE and HREE are 1346.44×10^{-6} and 53.52×10^{-6}, respectively. Electron microprobe (EMP) analysis show that the high content of REE occurred in monazites, which are associated with minerals such as chlorites, rutiles and zrcon.

Conclusioins: The high contents of rare earth elements (REEs) occur in weathering crust of lamproite in Majiang area, southestern Guizhou Province and relationship between the contents of rare earth element and degree of weathering of lamproite is a positively correlation. The weathering crust of lamproites are characterized by enrichment of LREE (La, Ce, Nd and Pr), it has conditions and potential to form rare earth element deposit. The REE in weathered lamproite are mostly in the form of rare earth independent mineral, which are mainly monazites.

Keywords: REE; characteristic of rare earth element enrichment; lamproite; southeast Guizhou

Acknowledgements: This study is supported by the *Project of Young Scientific Talent of Guizhou* (No. 2016117), the *Project of the Scientific and Technological Innovation Team of Sedimentary Deposits in Guizhou Province* (No. 2018-5613), the *Natural Science Foundation of China* (No. U1812402), *Guizhou Scientific and Technology Fund* (No. [2019]1315) and *Guizhou Talent Base Found* (No. RCJD2018-21)

First author: YANG Guanghai, male, born in 1993. He is a graduate student of Guizhou University, mainly engages in rare-earth, rare-metal and rare-scatted mineral deposits reasearch, Email: yangguanghai1993@163.com

Corresponding author: Gao Junbo, male, born in 1985, doctor, associate professor, is mainly engaged in sedimentary mineral deposits research and teaching, email: gaojunbo1985@126.com

Manuscript received on: 2018-10-06; Accepted on: 2019-06-15; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.011