云南离子吸附型稀土矿成矿规律

陆蕾[1,2)]，王登红[1)]，王成辉[1)]，赵芝[1)]，冯文杰[3)]，徐晓春[2)]，陈晨[1)]，钟海仁[4)]

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）合肥工业大学资源与环境工程学院，合肥，230009；3）云南省地质调查院，昆明，650051；
4）中国地质大学(北京)地球科学与资源学院，北京，100083

内容提要：云南的离子吸附型稀土矿(iRee)主要分布于滇西南一带，临沧岩体是近年来找矿进展最大、关注度最高的地区。与南岭地区iRee矿床最大的区别是矿床海拔均在1000m以上，属于高原低山丘陵地貌环境下形成的风化壳型矿床；成矿岩体沿“三江”断裂旁侧展布；岩性以二长花岗岩和钾长花岗岩为主，多呈中粗粒结构；成岩锆石U-Pb年龄集中分布于208～240Ma和52～80Ma两个区间；按轻重稀土在基岩中的配分，可将基岩分为LREE型和HREE型；前者主要富集轻稀土，后者重稀土相对富集；局部富集HREE的LREE型基岩形成的风化壳，是目前云南发现重稀土异常的主要类型，有可能成为今后寻找HREE矿床的主要目标。含稀土矿物存在与否对REE成矿的贡献具有举足轻重的意义；除斜长石、黑云母和角闪石等造岩矿物中含少量REE外，含稀土副矿物是基岩REE的重要来源；基岩交代作用类型和强度不同决定了含稀土矿物的丰富程度和矿化强度；如早期交代作用主要产生铈硅磷灰石、铈萤石和氟碳铈矿等含LREE的矿物；随着交代作用的增强，HREE的活化作用增强，则产生如高钇钍石、钇萤石和氟碳钇矿等矿物；在风化作用下易破碎解离的含稀土矿物如榍石、褐帘石和氟碳酸盐矿物等是矿床中Ree^{3+}的主要来源。含矿风化壳的物质组成可分为碎屑矿物、黏土矿物和副矿物三类，黏土矿物是风化壳中Ree^{3+}的主要载体；完整的花岗岩风化壳从表土层→全风化层→半风化层→微风化层都有发育，全风化层是主要的含矿层；根据稀土在风化壳中的分布特征，可分为“弓背式”、“喇叭式”和“波浪式”；因表土层厚度的不同，又可分为“深潜式”和“表露式”。Ree^{3+}在风化壳中的迁移与富集除受控于基岩、地貌、环境等因素外；持续反复的风化作用也是影响Ree^{3+}富集成矿的重要因素。

关键词：稀土；云南；离子吸附型稀土矿；稀土矿物

云南已经探明的离子吸附型稀土矿(iRee)资源只占我国该类型矿床探明资源储量的2%。自1993年发现以来，因其并非云南的优势矿种且开采程度不高，对云南iRee矿床的研究一直未受到重视。随着社会对稀土矿特别是重稀土的需求量日益剧增，云南iRee矿床逐渐引起关注。自2011年中国地质调查局启动“三稀(稀有、稀土、稀散)”项目以来，云南iRee矿找矿工作取得了多个重要的找矿突破；除已开采的陇川iRee矿床外，云南滇西一带相继发现了多个iRee矿床和异常矿化点或矿化带(Wang Denghong et al.，2007，2012，2013a，2013b，2017，2019；Feng Wenjie et al.，2016；Lu Lei et al.，2019)。本文是对云南已发现的花岗岩风化壳型iRee矿床的研究成果，包括：分布特征、成矿母岩特征、稀土矿物特征、稀土元素的分布规律和iRee矿床的成矿规律等。

1 云南iRee矿床的分布

云南iRee矿床在花岗岩、中酸性火山岩和变质岩的风化壳中都有分布。根据目前已发现的iRee

注：本文为中国地质调查局“中国矿产地质志”项目(编号DD20160346、DD20190379)，“战略性新兴产业矿产调查”工程“松潘-甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价”项目(编号DD20190173)，“大宗急缺矿产和战略性新兴产业矿产”工程“华南重点矿集区稀有稀散和稀土矿产调查”项目(编号DD20160056)及国家重点研发计划“我国锂能源金属成矿规律、靶区优选与重点查证”课题(编号2017YFC0602701)资助的成果。
收稿日期：2019-09-21；改回日期：2019-10-28；网络发表日期：2019-12-02；责任编辑：周健。
作者简介：陆蕾，女，1987年生。在读博士研究生，主要从事岩石学、矿物学和矿床学的研究工作。Email：kasablina@163.com。通讯作者：王登红，男，1967年生。研究员，博士生导师，现主要从事矿产资源调查与研究工作。Email：wangdenghong@vip.sina.com。

引用本文：陆蕾，王登红，王成辉，赵芝，冯文杰，徐晓春，陈晨，钟海仁. 2020. 云南离子吸附型稀土矿成矿规律. 地质学报，94(1)：179～191，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020111.
Lu Lei，Wang Denghong，Wang Chenghui，Zhao Zhi，Feng Wenjie，Xu Xiaochun，Chen Chen，Zhong Hairen. 2020. The metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in Yunnan Province. Acta Geologica Sinica，94(1)：179～191.

矿床的成矿母岩类型,以花岗岩为主;矿床多产于滇西南一带,滇中和滇东南次之,成矿母岩为"三江(怒江、澜沧江和金沙江)"构造带南边侵入的花岗岩,沿"三江"构造带旁侧展布(图 1、表 1)。

目前云南发现的 iREE 矿床类型可分为以下 5 种:①产于花岗岩风化壳的离子吸附型轻稀土矿床(iLREE);②产于花岗岩风化壳中的离子吸附型高铕中钇型重稀土矿床(高 Eu,中 Y,iHREE);③产于花岗岩风壳中的离子吸附型富钇重稀土矿床(富 Y,iHREE);④产于变质岩风化壳的离子吸附型中钇轻稀土矿床(中 Y,iLREE);⑤产于玄武岩风化壳的离子吸附型富铕轻稀土矿床(富 Eu,iLREE)(表 1)。

表 1 云南 iRee 矿床特征及分布一览表

Table 1 The distribution of iRee deposit in Yunnan

成矿区	矿床名称	成矿母岩	岩体时代	稀土矿物	矿床类型	矿床规模	资料来源
滇东成矿区	CG iRee 矿床	拉斑玄武岩	华力西期	磷铝铈矿、褐钇铌矿	富 Eu,iLRee	中型	BGMRY,1993❶
元谋-峨山成矿区	水桥寺 iRee 矿床	角闪黑云二长花岗岩、黑云条痕混合岩、石英条痕混合岩、黑云片岩	—	独居石、褐钇铌矿、含铪锆石	中 Y,iLRee	大型	本文
滇东南成矿区	建水普雄 iRee 矿床	碱性正长岩、霞石正长岩	燕山期	独居石、磷钇矿、烧绿石、水磷镧石、水磷铈石、水菱钇矿、氟碳镧矿	iLRee	大型	Li Mingxiao et al.,2017
	BHSiRee 矿床	黑云二长花岗岩	燕山晚期	榍石、磷灰石、独居石、磷钇矿、锆石等	富 Y,iHRee	矿点	BGMRY,1993❶
临沧成矿区	QN iRee 矿床	似斑状黑云二长花岗岩	印支期	褐帘石、磷灰石、独居石、钍石、磷钇矿、氟碳铈矿、氟碳钇矿等	中 Y,iLRee	中型、矿点	本文
	BWS iRee 矿床	黑云二长花岗岩	华力西期—印支期	褐帘石、独居石、氟碳铈矿、钍石等	高 Eu,中 Y,iHRee	矿化点	BGMRY,1993❶
	上允 iRee 矿床	中粗粒黑云母二长花岗岩、似斑状黑云母二长花岗岩	印支期	褐帘石、独居石、钍石	iLRee	大型	He Xianchuan et al.,2016
	勐往 iRee 矿床	似斑状黑云二长花岗岩	印支期	褐帘石、独居石、钍石	iLRee	大型	Zeng Kai et al.,2019
	MH iRee 矿床	中细粒黑云母二长花岗岩	印支期	褐帘石、磷灰石、独居石、钍石、磷钇矿、氟碳铈矿、氟碳钇矿等	富 Y,iLRee;iHRee	大型;矿化点	本文;BGMRY,1993❶
腾冲-陇川成矿区	土官寨 iRee 矿床	二长花岗岩	燕山期	独居石、氟碳铈矿,氟碳铈钇矿	富 Y,iLRee、	中型	Zhang Bin et al.,2019
	蒜叶坝 iRee 矿床	黑云母二长花岗岩	燕山期	独居石、氟碳铈矿	iLRee	中型	
	尖山脚 iRee 矿床	黑云母二长花岗岩	燕山期—喜马拉雅期	独居石、氟碳铈矿	iLRee	中型	
	陇川龙安 iRee 矿床	黑云角闪钾长花岗岩	华力西—印支期	褐帘石、独居石、磷灰石,褐钇铌矿	iLRee	中型	本文
	营盘山 iRee 矿床	似斑状黑云钾长花岗岩、斑状黑云母二长花岗岩、细粒黑云二长花岗岩	华力西—印支期	独居石、氟碳铈矿	iLRee	中—大型	Zhang Bin et al.,2019
	大曼别 iRee 矿床	花岗岩	华力西—印支期	独居石、氟碳铈矿	iLRee	大型	
	一碗水 iRee 矿床	黑云母钾长花岗岩	华力西—印支期	独居石、氟碳铈矿	iLRee	中型	

2 成矿母岩特征

云南 iREE 矿床成矿母岩的种类较多,主要是黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩、碱性正长岩、霞石正长岩、混合花岗岩、玄武岩等;其中花岗岩类占比最大,混合岩和玄武岩少见。LREE 型成矿花岗岩的类型较多,主要是中粗粒黑云母二长花岗岩、黑云角闪钾长花岗岩、花岗闪长岩和似斑状二长花岗岩,

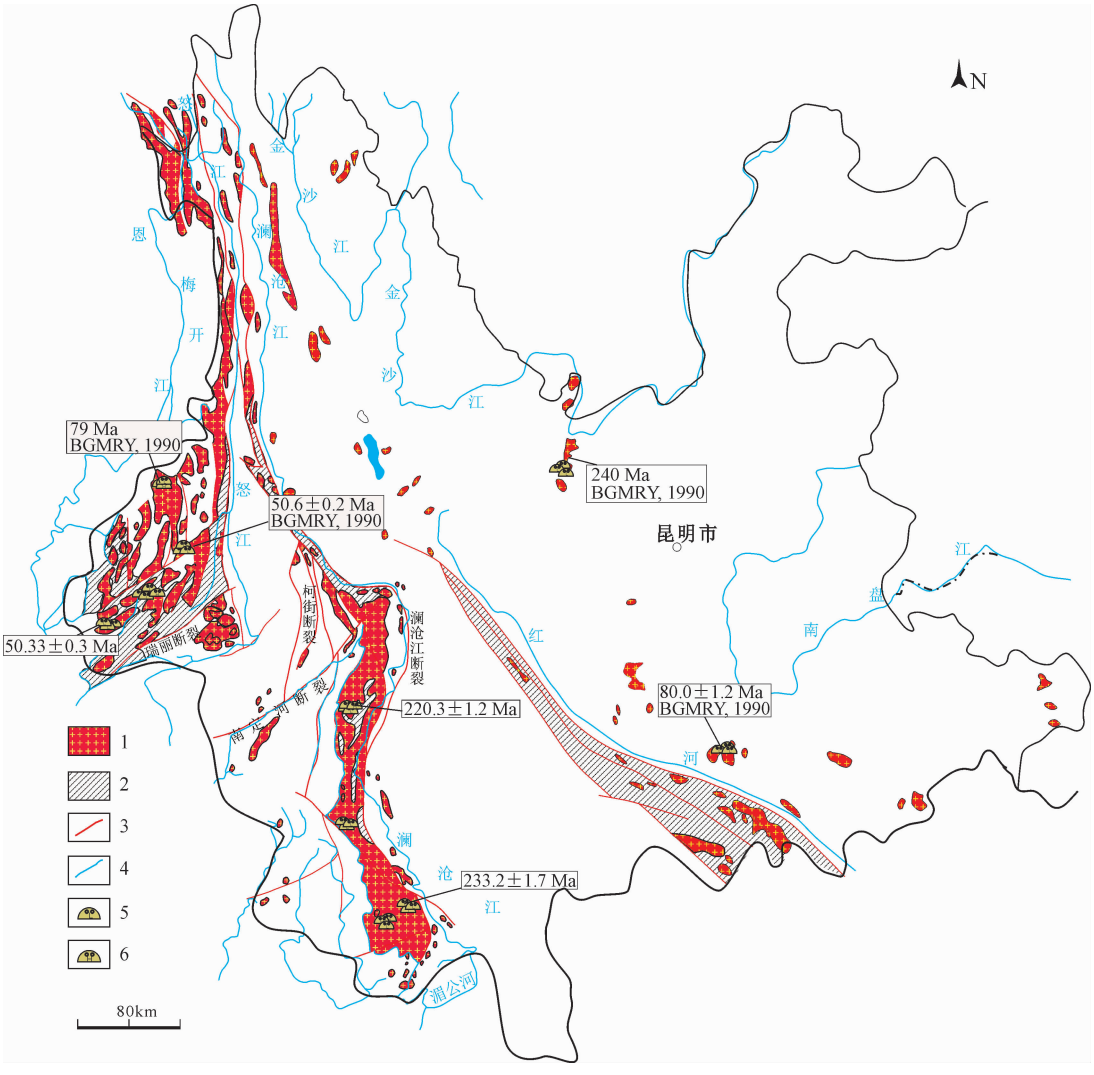


图 1　云南侵入岩及稀土矿床分布图[1,2,3]

Fig. 1　Distribution of granite and iRee deposits in Yunnan[1,2,3]

1—花岗岩;2—变质岩;3—断裂;4—河流;5—iLREE 矿床;6—iHREE 矿床

1—Granite;2—metamorphic rock;3—fault;4—river;5—iLREE deposit;6—iHREE deposit

常发生绿泥石化、硅化、绿帘石化、碳酸盐化和轻稀土矿化等。HREE 型成矿花岗岩主要是黑云母二长花岗岩、中细粒二长花岗岩、中细粒二云二长花岗岩等;具有(绢)白云母化、萤石化、碳酸盐化和重稀土矿化等特征。

从成岩时代来看,与花岗岩风化壳有关的矿床的基岩的锆石年龄主要集中分布在 208～240Ma 和 52～80Ma 两个区间,HREE 型和 LREE 型成矿花岗岩在时代上并无规律性。

根据 110 件样品的分析结果,与 iRee 矿床有关的成矿母岩具有较高的硅含量(60.64%～79.12%,平均值 69.05%);∑REE 含量(115.07×10^{-6}～1111.09×10^{-6},平均值 346.02×10^{-6}),∑Ce/∑Y 比值(0.49～18.10);多以富集 LREE 为主(97%),HREE 型较少(3%)(表 2);后者相对前者硅含量更高,是岩浆高度分异演化的产物。LREE 型花岗岩的稀土配分曲线呈“右倾式”,LREE 相对富集;HREE 型稀土配分曲线呈现“右倾式”或“海鸥式”,HREE 相对富集(图 2)。

3　稀土矿物特征

基岩中 REE 的丰度高,有利于风化壳矿床的形成,但不是决定性因素;造岩矿物中 REE 的含量通常占全岩的 5%～50%,而(含)稀土副矿物对全岩 REE 的贡献占举足轻重的地位(Yang Yueqing, 1981;Wu Chengyu et al., 1990,1992)。

3.1　稀土矿物的种类

云南 iRee 矿床中的(含)稀土副矿物也可分为

表 2 云南典型成矿花岗岩体中稀土元素含量($\times 10^{-6}$)

Table 2 REE content ($\times 10^{-6}$) in representative REE ore-bearing granites in Yunnan

复式岩基	岩体	岩性	年龄(Ma)	类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	ΣCe/ΣY	资料来源
临沧花岗岩基	QN 岩体	似斑状中粗粒黑云母二长花岗岩	220.3	LREE 型	59.52	111.99	13.54	50.14	7.93	1.03	6.28	0.78	3.68	0.70	1.89	0.23	1.71	0.20	16.0	275.7	7.7	本文
					37.43	69.07	8.79	33.04	6.02	1.17	5.57	0.83	4.66	0.87	2.00	0.24	1.52	0.14	20.2	191.5	4.3	
		中细粒二云二长花岗岩		LREE-Y 型	154	84	41.27	166	41.72	6.18	38.89	6.38	33.50	5.78	14.24	1.87	13.6	1.47	143	752.1	2.5	
	MH 岩体	中细粒黑云母二长花岗岩			38.1	75.4	8.45	30.3	6.43	1.16	5.67	1.02	6.61	1.37	4.17	0.63	3.91	0.59	37.8	221.6	2.6	
	临沧岩体	中粗粒黑云母二长花岗岩		LREE 型	41.5	87.1	9.89	36.3	7.52	1.14	6.11	0.95	5.07	0.83	2.28	0.31	2.02	0.29	24	225.3	4.4	
		浅色似斑状细粒二长花岗岩		HREE 型	7	16.06	2.23	8.92	3.77	0.28	5.59	1.2	7.61	1.64	5.04	0.8	5.09	0.71	49.1	115.1	0.5	BGMRY, 2003❸
高黎贡山南段岩群	邦棍尖山岩体	中细粒黑云母钾长花岗岩	50.33	LREE 型	81.72	155.48	18.13	65.00	10.90	1.74	9.37	1.25	6.69	1.35	3.98	0.54	3.88	0.44	30.7	391.2	5.7	本文
		中粗粒角闪黑云钾长花岗岩			48.12	92.73	11.62	42.69	9.26	0.55	8.08	1.20	6.69	1.37	3.90	0.56	4.28	0.50	33.8	265.4	3.4	
		中粗粒角闪黑云钾长花岗岩			162.91	154.63	33.69	127.16	27.00	1.70	24.90	3.80	21.15	4.18	11.13	1.52	11.32	1.25	120	706.8	2.5	
	古永岩体	中粒黑云母花岗岩	79	HREE 型	14.99	33.45	4.34	17.59	5.83	0.39	9	1.58	10.55	2.39	7.42	1.21	8.54	1.47	72.7	191.4	0.7	BGMRY, 2003❸
					10.07	24.3	3.28	13.01	4.17	0.24	5.14	0.92	6.18	1.39	4.13	0.73	5.44	0.93	43.1	123.1	0.8	
		钾长花岗岩		LREE 型	56.58	120.8	14.5	51.53	12.14	0.36	11.26	2.28	13.35	2.89	8.47	1.43	9.41	1.38	82.9	389.3	1.9	
	来利山	紫苏二长花岗岩	52		81.39	155.09	16.75	56.6	10.56	1.69	8.46	0.87	6.59	1.58	3.22	0.52	3.22	0.51	38.3	385.3	5.1	
		中粒钾长花岗岩			40.24	75.39	9.99	41.52	12.3	0.57	12.77	2.12	13.45	3.09	8.18	1.35	8.93	1.33	86.8	318.0	1.3	
个旧花岗岩基	白云山岩体	碱性正长岩	80	LREE 型	307	509	32.9	163	21.2	3.76	16.1	1.77	8.45	1.45	3.82	0.515	3.33	0.49	38.3	1111.1	14.0	
		霞石正长岩			287	418	54.3	81.2	7.91	1.57	7.59	0.641	3.31	0.7	2.34	0.437	3.51	0.61	27.8	896.9	18.1	
	长岭岗岩体	霞石正长岩			365.3	456.36	36.3	75.62	8.52	1.35	4.86	0.91	2.3	0.54	1.39	0.33	1.95	0.3	16.7	972.7	32.3	

LREE 型和 HREE 型;前者为榍石、褐帘石、独居石、硅铈石、含铪锆石、钍石、氟碳钙铈矿、氟碳铈钡矿等;后者为磷钇矿、氟碳钇矿、硅铍钇矿、富钇钍石、钇萤石和褐钇铌矿等(图 3)。

3.2　稀土矿物的地球化学特征

含稀土副矿物的化学成分常常较为复杂:① Ree^{3+} 与 Ca^{2+} 和 Na^{+} 等具有相似的离子半径,Ree^{3+} 可取代这些离子以形成类质同象分布于矿物晶格中;② 由于 REE 各元素离子半径相近,在同一稀土矿物中常含有不止一种稀土元素(表 3)。

3.3　稀土矿物的成因

稀土矿物的丰富程度常与花岗质岩浆的结晶和岩浆期后热液流体的交代作用相关;晚期形成的花岗岩中的稀土矿物相对于早期花岗岩中的稀土矿物种类更多;如临沧岩体早期花岗岩中的(含)稀土矿物主要为榍石、褐帘石、磷灰石和锆石等;中期—晚期,磷灰石中常见到独居石、磷钇矿和钍石等矿物,REE 的活化作用明显增强(图 3b、f、k、l);晚期的热液交代作用则产生如铈萤石和钇萤石等氟碳酸盐矿物,常呈他形粒状或不规则状沿矿物解理面、裂隙和孔隙等交代充填(图 3h、j);这也是造成基岩中稀土元素含量、占比不同的主要原因。

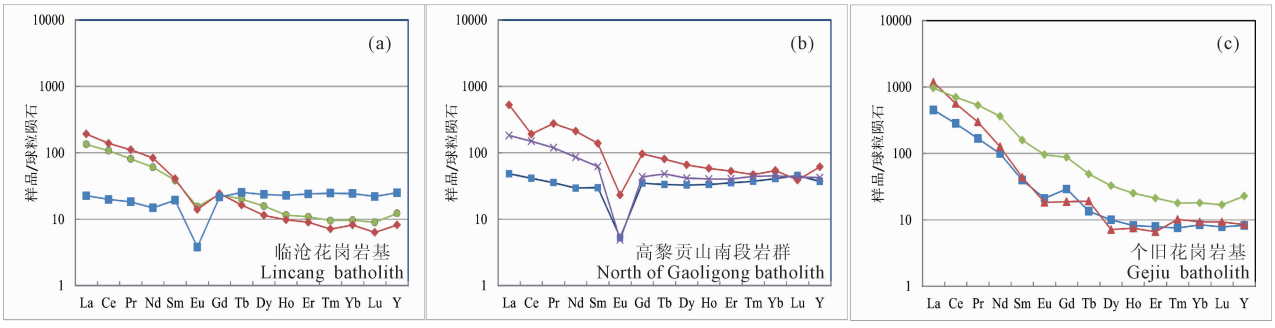


图 2　云南典型成矿花岗岩体的球粒陨石标准化稀土配分曲线

Fig. 2　Chondrite-normalized REE patterns of the representative REE ore-bearing granites in Yunnan

表 3　云南花岗岩中含稀土矿物的稀土元素分布特征(%)

Table 3　REE geochemical characteristics of REE minerals from the REE-bearing granites in Yunnan(%)

矿物名称(英文名称)	化学成分式	∑REE	LREE	HREE	Y/∑REE	Eu/∑REE	含量
褐帘石(Allanite)	$(Ce,Ca,Y)_2(Al,Fe^{3+})_3(SiO_4)_3(OH)$	25.13 (n=7)	19.41	5.73	0.03	0.01	2～5
磷灰石(Apatite)	$Ca_5(PO_4)_3F$	13.62 (n=28)	1.34	12.27	0.17	0.00	2～5
氟碳铈矿(Bastnaesite)	$(Ce,La)(CO_3)F$	43.42 (n=15)	27.39	16.03	0.14	0.01	1～3
新奇钙钇矿(Synchysite-Y)	$(Y,Dy)Ca(CO_3)_2F$	33.58 (n=9)	14.08	19.50	0.10	0.00	1～2
铈硅磷灰石(Britholite)	$(Ce,Ca)_5(SiO_4,PO_4)_3(OH,F)$	38.9 (n=5)	16.154	22.746	0.3	0	2～3
硅铈石(Cerite)	$(Ce,Ca)_3(Mg,Fe^{2+})Si_7(O,OH,F)_{18}$	72.86 (n=6)	56.69	16.17	0.00	0.00	1
褐钇铌矿(Fergusonite)	$YNbO_4$	47.20 (n=3)	6.23	40.97	0.29	0.02	0.1～1
独居石(Monazite)	$(Ce,La,Nd,Th)PO_4$	45.71 (n=36)	37.70	8.00	0.03	0.02	2～3
氟碳钙铈矿(Parisite)	$(Ce,La)_2Ca(CO_3)_3F_2$	25.55 (n=4)	8.90	16.65	0.13	0.01	0.5～1
榍石(Sphene)	$CaTi[SiO_4]O$	5.70 (n=11)	0.78	4.94	0.28	0	1～2
磷钇矿(Xenotine)	YPO_4	51.33 (n=17)	1.91	49.42	0.47	0.00	0.1～1
铈萤石(Yttrocerite)	$(Ca,Ce)F_2$	35.26 (n=10)	13.56	21.70	0.12	0.03	1～5
钛钇钍矿(Yttrocrasite)	$(Y,Th,Ca,U)(Ti,Fe^{3+})_3(O,OH)_4$	18.82 (n=37)	4.56	14.26	0.20	0.02	2～4
钇萤石(Yttrofluorite)	$(Ca,Y)F_2$	48.95 (n=9)	28.69	20.26	0.12	0.01	1～5
锆石(Zircon)	$(Zr,Y)(Si,P)O_4$	14.32 (n=5)	2.05	12.28	0.15	0.00	1～5
方铈石(Cerianite) ①	$(Ce^{4+},Th)O_2$	84.5					1～2
硅铍钇矿(Gadolinite) ①	$Y_2Fe^{2+}Be_4Si_2O_{10}$	45.8～50.5					0.1～1
烧绿石(Pyrochlore)①	$(Na,Ca,Ce)_2Nb_2O_5(OH,F)$	0.7～4.8					1

注:①Chen Deqian et al.,1990。

4　矿化特征

4.1　矿体特征

离子吸附型稀土矿属于风化壳型矿床,成矿过程受到气候、地形等表生条件的制约。云南 iRee 矿床所处海拔均大于 1000m,最高可达 2500m,是区别于南岭 iRee 矿床的最大特征。含矿花岗岩风化壳即为矿体,呈层状、似层状产于风化壳中,厚度一般

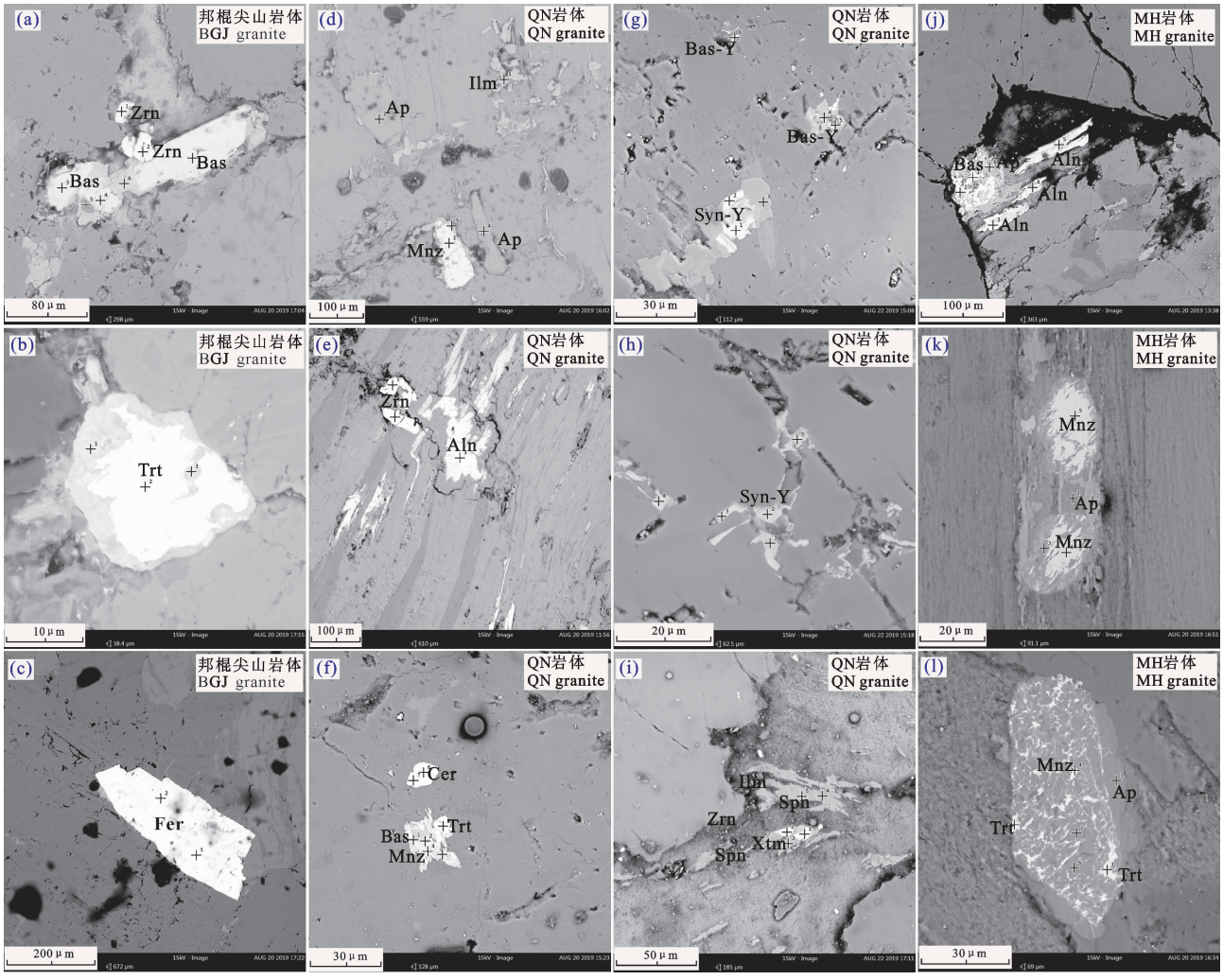


图 3 云南成矿花岗岩中稀土矿物的背散射图像

Fig. 3 BSE image of rare earth element minerals in parent rock of iRee deposit in Yunnan

Spn—榍石;Aln—褐帘石;Ap—磷灰石; Mnz—独居石;Xtm—磷钇矿;Zrn—锆石;Bas—氟碳铈矿;Syn-Y—新奇钙钇矿;Trt—钍石;Cer—硅铈石;Fer—褐钇铌矿;Ilm—钛铁矿

Spn—Sphene;Aln—allanite;Ap—apatite; Mnz—monazite;Xtm—xenotime;Zrn—zircon;Bas—bastnaesite;Syn-Y—synchysite-Y;Trt—thorite;Cer—cerite;Fer—fergusonite;Ilm—ilmenite

3～10m,最厚可达 30m,随地形变化而变化,常常在低缓山丘的山顶最厚,沿山坡向下逐渐变薄,在靠近沟谷的坡脚处,常常发育坡积碎屑或裸露基岩,而矿体缺失。因此,在平面上以山丘为中心,构成由沟谷隔截的分离矿体,其形态多椭圆形和不规则形。矿体倾斜角一般较缓,山脊多为 5°～10°,至山坡略变陡为 20°～30°。矿体埋深可分为裸露于地表和具有覆盖层两种。后者覆盖层厚约 1～4m,最厚可达 10m 以上,通常为风化壳的表土层。

4.2 风化壳的物质组成

风化壳的物质组成可分为碎屑矿物、黏土矿物和副矿物三类。根据三个成矿区 5 个风化壳剖面的统计,发育完整的风化壳从下至上,碎屑矿物的含量逐渐增高(41%→54%),黏土矿物含量逐渐降低(47%→22%);副矿物则以重矿物的形式分散于风化壳中。

碎屑矿物以石英和长石为主,少量云母、角闪石;石英和长石多不规则状,磨圆度较差,从表土层至全风化层含量逐渐增加(6%→29%);长石碎屑主要为钾长石(微斜长石),受风化作用变得疏松易碎(图 4a);斜长石强烈绢云母化(水云母)化,在风化壳中只剩残余(2%→5%);云母多水化,失去弹性。

黏土矿物以高岭石为主,其次为少量伊利石和蒙脱石、蛭石和绿泥石(图 4)。蛭石主要出现在全风化层上部,含量约 6%;绿泥石则常常出现于全风化层下部,含量 13%。从表土层至全风化层,高岭

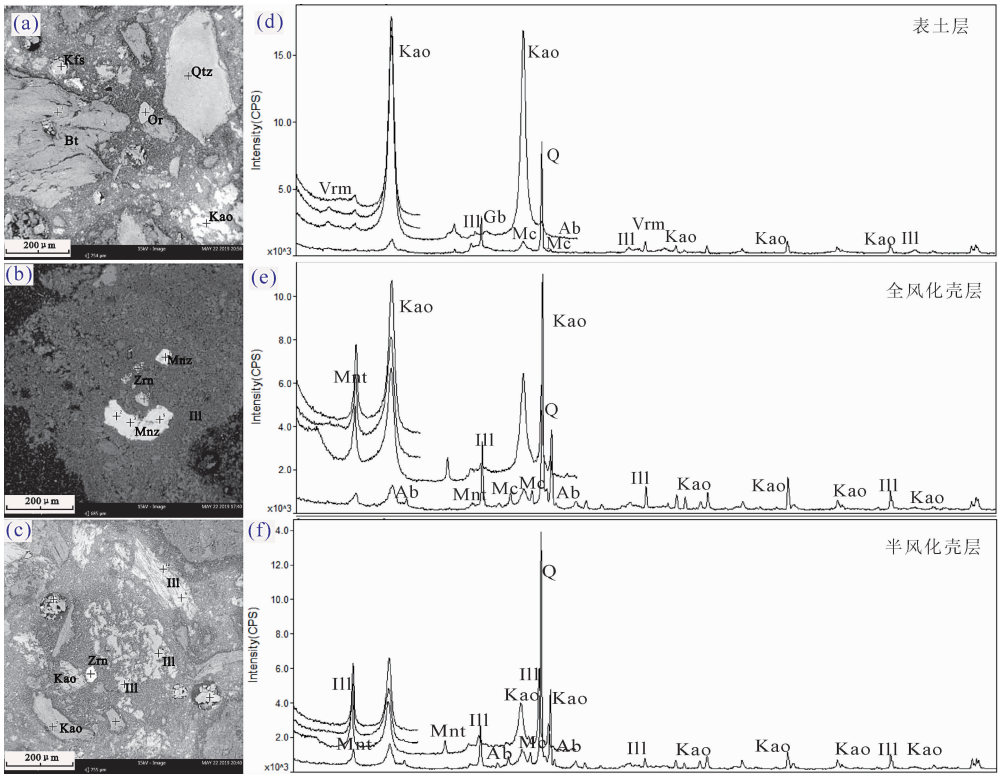


图 4　MH 矿区花岗岩风化壳中残留稀土矿物的背散射图像和黏土矿物 XRD 谱线图

Fig. 4　BSE image of rare earth element minerals and representative X-ray diffraction patterns of weathering crust in MH iRee deposit

Qtz—石英；Kfs—钾长石；Mc—微斜长石；Bt—黑云母；Zrn—锆石；Ilm—钛铁矿；Mnz—独居石；Kao—高岭石；Ill—伊利石（水云母）；Mnt—蒙脱石

Qtz—Quartz；Kfs—K-feldspar；Mc—microcline；Bt—biotite；Zrn—zicorn；Ilm—ilmenite；Mnz—monazite；Kao—kaolinite；Ill—hydromuscovite；Mnt—montmorillonite

土含量逐渐降低（88%→51%），伊利石和蒙脱石等黏土矿物则由低到高（6%→38%），伊利石和蒙脱石主要是长石和云母类矿物的蚀变、风化产物，在风化壳中含量的高低与矿物含量和风化程度等有关系；如 MH 矿区的伊利石（38%）明显高于 QN 矿区（14%）；而蒙脱石则是后者（39%）高于前者（11%）。

副矿物是在风化作用下难以解离的重矿物；主要是独居石、锆石、磷钇矿和褐钇铌矿等（图 4b、c）；其次为风化形成的方铈石和一些难辨认的含稀土矿物；基岩中常见的榍石、褐帘石、铈萤石、钇萤石和氟碳酸盐矿等在风化壳中几乎未见。

4.3　风化壳的化学组成

根据目前所研究的含矿花岗岩风化壳（QN 矿床、MH 矿床和 BGJ 矿床等）化学特征显示：风化壳中的 SiO_2 在表土层含量低于基岩，向下至全风化层含量逐渐增加，且高于基岩；Na_2O、K_2O 和 CaO 大量流失；Fe_2O_3、TiO_2 和 Al_2O_3 具有明显的惰性，风化壳自下而上含量增高；MnO、MgO、FeO 和 P_2O_5 等组分在风化壳中变化不大；风化壳中的稀土具有与基岩相似的球粒陨石配分曲线，全风化层和半风化层 ∑REE 相对于基岩更高（图 5a）。

4.4　稀土元素在风化壳中的分布规律

发育完整的花岗岩风化壳从表土层→全风化层→半风化层→微风化层都有发育。成矿花岗岩风化壳中，REE 主要富集于全风化层中，其次为半风化层。根据大量的钻孔资料结合前人的研究结果，可将不同剥蚀程度的风化壳中稀土元素的分布特征分为：弓背式、喇叭式和波浪式三种；发育完整的风化壳剖面通常呈“弓背式”，REE 的含量在表土层和半风化层含量较低，全风化层最高（图 4a）；“喇叭式”又可分为深潜式和表露式：若表土层较厚，REE 常在地表更深处富集（≥8m），呈“深潜式”（图 4b）；反之，若表土层较薄或不发育，REE 在地表较为富集，呈“潜伏式”（图 4c）；受微地形的影响，REE 受地表水作用影响，山顶淋滤作用以垂向为主，山腰除了垂向渗流作用以外，还有侧向渗流，因此稀土曲线多呈

“波浪式”(图 4d)。

LREE 与 HREE 在钻孔中的分布形式可分为同层富集和分层富集。如 QN 矿床 14 个风化壳钻孔中,出现 HREE 异常的钻孔从地表向下至 13m,LREE 与 HREE 的含量呈现出逐渐增高的趋势;到 14m,LREE 降低,HREE 增高,显示出分层富集的特征,说明 LREE 和 HREE 具有不同的迁移轨迹(图 4b)。从整体看,LREE 和 HREE 在全风化层中的分布形式,主要显示出 LREE 在全风化层中上部富集,HREE 在下部富集。

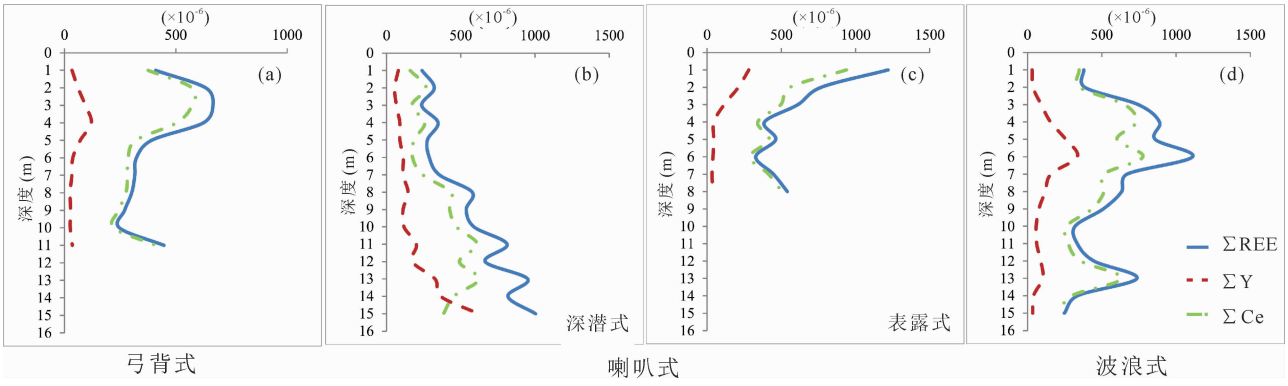


图 5 云南 QN iRee 矿床风化壳剖面中稀土元素的富集规律

Fig. 5 Diagram showing ΣREE, ΣCe, ΣY of weathering crust in QN iRee deposit

表 4 云南 QN iRee 矿床风化壳剖面全相和离子相稀土分布特征(×10⁻⁶)

Table 4 REE and Ree^{3+} content (×10⁻⁶) in the representative REE ore-bearing granites in QN iRee deposit

	全相稀土含量							离子相稀土含量						
样品编号	P1 (0.3m)	P2 (0.6m)	P3 (2.5m)	P4 (4.5m)	P5 (6.5m)	P6 (8.5m)	P7 (10.5m)	P1 (0.3m)	P2 (0.6m)	P3 (2.5m)	P4 (4.5m)	P5 (6.5m)	P6 (8.5m)	P7 (10.5m)
岩性	表土层	全风化层	全风化层	全风化层	全风化层	半风化层	微风化层	表土层	全风化层	全风化层	全风化层	全风化层	半风化层	微风化层
La	39.4	45.4	169	112	120	60.1	76	0.15	3.64	99.5	48.2	54.4	15.4	9.37
Ce	98.5	173	108	146	135	116	122	0.39	26.6	30.3	21.7	17.8	4.97	6.28
Pr	8.27	9.88	35.8	24.3	25.3	12.3	14.8	0.05	1.05	22.4	11.7	12.6	3.73	2.42
Nd	29.4	39.1	132	92.3	93.7	42.1	49.1	0.09	3.73	80.2	41.9	46.6	14.2	8.71
Sm	5.1	5.94	24.1	15.2	16.8	7.92	8.36	0.05	0.66	15.8	7.85	9.41	2.82	1.27
Eu	0.54	0.56	4.29	2.3	2.61	1.06	1.16	0.05	0.13	3.46	1.65	2.07	0.58	0.23
Gd	3.68	3.67	18.5	10.3	13	5.75	5.75	0.05	0.51	12.9	5.67	8.12	2.31	0.77
Tb	0.53	0.49	2.56	1.36	1.79	0.77	0.94	0.05	0.06	1.75	0.74	1.15	0.32	0.09
Dy	2.51	2.14	12.1	6.26	8.86	3.63	4.8	0.05	0.3	9.15	3.89	6.21	1.83	0.48
Ho	0.45	0.41	2.14	1.17	1.53	0.65	0.95	0.05	0.05	1.74	0.69	1.12	0.32	0.09
Er	1.2	1.07	5.57	2.93	3.91	1.73	2.75	0.05	0.12	4.15	1.6	2.69	0.79	0.19
Tm	0.18	0.16	0.72	0.41	0.53	0.25	0.42	0.05	0.05	0.53	0.21	0.34	0.1	0.05
Yb	1.04	1	4.37	2.46	3.15	1.5	2.61	0.05	0.08	3.04	1.24	2.03	0.59	0.13
Lu	0.17	0.17	0.71	0.41	0.5	0.24	0.43	0.05	0.05	0.42	0.17	0.28	0.08	0.05
Y	10.6	9.04	48	27.8	33	15.7	22.9	0.06	1.18	36.2	14.3	24.3	8.04	2.06
ΣREE	201.57	292.03	567.86	445.2	459.68	269.7	312.97	1.24	38.21	321.54	161.51	189.12	56.08	32.19
浸出率(%)	—							0.62	13.08	56.62	36.28	41.14	20.79	10.29

以 QN 矿床风化壳剖面中 REE 的分布特征为例:表土层中 Ree^{3+} 含量最低,在全风化层中含量最高,到半风化层中降低;各个稀土元素在风化壳中的分布特征亦有不同(表 4、图 5):① 由于 Ce^{3+} 在氧化环境下易被氧化成 Ce^{4+} 而形成 $Ce(OH)_4$ 沉淀(Wu Chenyu, 1988, 1989; Wu Chenyu et al., 1989; Chen Deqian et al., 1990),在全风化壳上部显示出正异常,可浸出率也达到最高,至全风化层中下部含量逐渐降低,配分曲线呈现出亏损;在半风化层中,Ce^{3+} 急速降低,浸出率仅 4%;②Eu^{3+} 在风化壳中的亏损程度较全相 Eu 有降低的趋势(图 5a、c),浸出率高达 80%,显示出在全风化层中上部较为富集;③La^{3+}、Nd^{3+}、Pr^{3+} 显示出主要在全风化层中上部富集,在全风化层下部含量逐渐降低;④全相 HRee

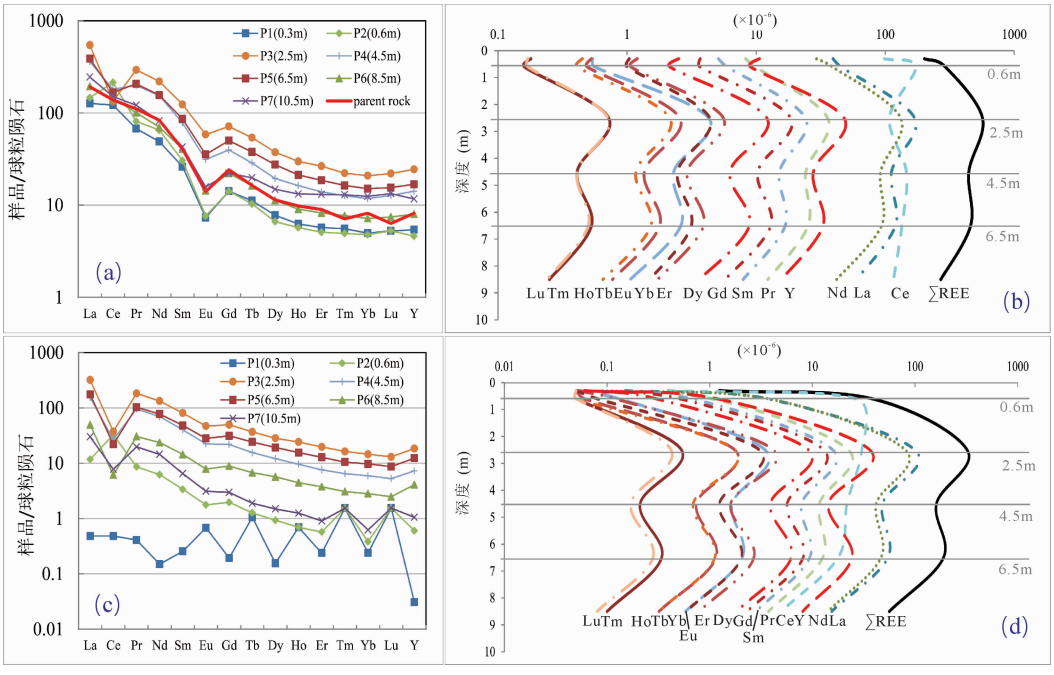


图 6　QN 矿床风化壳剖面球粒陨石标准化全相(a,b)和离子相(c,d)稀土配分曲线(a,c)和分布规律图(b,d)

Fig. 6　Chondrite-normalized REE (a,b) and Ree^{3+} (c, d) patterns (a, c) and diagram showing ∑REE of the weathering crust (b, d) in QN deposit

在全风化层上部较表土层→全风化层上部表现出急速降低的特征,而 $HRee^{3+}$ 在全风化层上部则未显示出该特征(图 5b、d),向下含量逐渐升高;⑤ Y^{3+} 在全风化层上部呈现出负异常,至中下层显示出正异常,显示出全风化层中下部含量增加的特征;⑥ Tm^{3+}、Lu^{3+} 在风化壳上部分布曲线呈正异常,向下异常减弱;在相同的浸出条件下,Tm^{3+} 相对于 Lu^{3+} 更易于浸出(图 5d);⑦ Tb^{3+}、Dy^{3+}、Ho^{3+}、Er^{3+}、Yb^{3+} 更倾向于在全风化层下部富集。

5　讨论

5.1　与 iHREE 型稀土矿床有关的基岩

云南地处特提斯—喜马拉雅构造域与滨太平洋构造域的交接复合部位,经历了复杂的地壳发展演化历史,地质构造复杂,地层发育齐全,建造类型多样,区域变质作用强烈,多期次多类型多旋回的岩浆活动,为稀土元素的活化、运移、富集提供了良好的基础地质条件,使云南具有多种高稀土背景值和稀土类型的地质体,这为表生作用下形成 iRee 矿床,提供了优越的地质背景条件,也预示了在云南寻找稀土矿的良好前景。

云南境内 iRee 矿床多赋存于复式花岗岩岩基的风化壳中,如临沧、个旧和高黎贡山等岩基。这些岩基一般含褐帘石、榍石等副矿物,岩石中稀土含量较低,Eu 轻度亏损,球粒陨石标准化模式为轻稀土富集型。经印支期、燕山期和喜马拉雅期,逐渐演化为均一化程度较高的,高 W、Sn 丰度的 S 型岩体,稀土丰度有所提高,Eu 亏损从明显到较高,并出现一些高钇重稀土富集型岩体(BGMRY, 1990[❷])。

云南目前发现的 iRee 矿床以 LREE 型为主;HREE 型较少,只有少量矿点或矿化点,如,BHS 矿化点和 BWS 矿化点、QN 矿点和 MH 矿化点。这些 HREE 型基岩常常为 LREE 型基岩的一部分,与后者的区别是出现白云母(绢云母)化、萤石化和重稀土化,岩石粒度多为中细粒(约 29%);如 QN 矿床和土官寨矿床,这类矿床主要富集 LREE,HREE 在矿体中可局部富集(占稀土总量 25%～49%),基岩的 LREE/HREE 比值 1.0～3.0,稀土配分曲线呈现“右倾式”或“海鸥式”(图 2a、b),这类花岗岩风化壳是今后在云南寻找重稀土资源的重点关注对象。

5.2　与 iRee 矿床有关的含稀土矿物

基岩中交代作用的普遍发育是稀土矿物富集的重要因素(Yang Yueqing, 1981; Zhao Zhi et al., 2014);如 QN 岩体中多见硅化、绿泥石化,BGJ 岩体中多见的钾化、绢云母化等蚀变特征。同时,交代作用的强度不同,对基岩中轻重稀土的比例亦有影响;如 QN 岩体中黑云母二长花岗岩中主要发育榍石、

褐帘石、独居石和少量磷钇矿等(含)稀土矿物;岩体西北边发育的细粒二云二长花岗岩中,黑云母多白云母化,或绢云母呈片状集合体交代斜长石,岩石中磷钇矿含量增多,并出现了高钇钍石、氟碳钇矿和氟碳钙钇矿等矿物,具有 HREE 活化的特征。

基岩中(含)稀土矿物的种类对风化壳中稀土元素的分配特征也有重要影响;如 QN 矿区发育的主要是似斑状黑云母二长花岗岩,其中对成矿有利的(含)稀土矿物主要是榍石、褐帘石、磷灰石和氟碳铈矿。当基岩中富集此类矿物时,则更倾向于形成 LREE 型风化壳;二云母二长花岗岩中,往往出现高钇钍石、氟碳钇矿和钇萤石等矿物组合,风化后易于形成 HREE 型风化壳。

决定花岗岩风化壳成矿与否的因素与(含)稀土矿物的可风化程度有很大关系(Yang Yueqing, 1981;Wu Chengyu et al., 1990,1992;Zhao Zhi et al., 2015)。如 MH 矿床含矿风化壳中,多见残留的独居石(图 4b)、磷钇矿、褐钇铌矿和锆石(图 4c)等矿物。这些矿物在自然环境中较为稳定,Ree^{3+} 不易被解离出来,多形成重矿物残留,难以形成 iRee 矿床;当基岩中常见榍石、褐帘石、磷灰石和氟碳酸盐类矿物时;由于这些矿物相对容易风化,风化后解离释放出大量的 Ree^{3+},通过运移、富集和存储等一系列成矿作用,相对易于形成 iRee 矿床。

5.3 风化壳中稀土元素的迁移、富集和次生富集

Ree^{3+} 在溶液中除了以络合物的形式迁移外,部分 $LRee^{3+}$ 亦可呈自由离子形式迁移;稀土元素在风化壳中的迁移能力随着原子序数的增大而增强,特别是 $HRee^{3+}$;pH 值也是影响 Ree^{3+} 迁移的重要因素。研究表明,pH 为 5.4～6.8 时,稀土的吸附率逐渐增大,且弱酸性对 LREE 吸附有利,弱碱性则对 HREE 有利(Chen Deqian et al.,1990)。

黏土矿物种类和含量的不同,也影响着 Ree^{3+} 的富集程度。各类黏土矿物对 Ree^{3+} 的吸附顺序为高岭石＜埃洛石＜蒙脱石、伊利石和蛭石(Wu Chengyu et al., 1990,1992);因此,在相同的浓度和 pH 值环境下,全风化层中具有较高含量的蒙脱石和(或)伊利石,更利于 Ree^{3+} 的保存;但是,含量最多的高岭土仍是 REE 的主要载体。

iRee 矿床主要形成于第四纪,岩石的风化过程漫长且不断变化(Wang Denghong et al., 2005;Zhao Zhi et al., 2017);风化作用使含稀土矿物中的 Ree^{3+} 不断解离,大量的 Ree^{3+} 随着雨水和地下水不断向下淋滤。由于表土层有腐殖酸的参与,pH＜5.4,呈酸性,使 Ree^{3+} 吸附性减弱,不断向下迁移,至全风化层因地下水和雨水的稀释等因素 pH 值升高,使土壤呈弱酸性,形成了利于 LREE 停留的环境;风化壳下部 pH 值缓慢上升呈弱碱性,HREE 吸附能力增强;持续、多次和循环的风化作用除了使主要含稀土副矿物中的 Ree^{3+} 大量解离和富集外,也使得造岩矿物中微量的 Ree^{3+} 得到多次的迁移和富集,不断丰富了风化壳中 Ree^{3+} 的物质来源。

6 结论

云南花岗岩风化壳型 iRee 矿床主要分布于滇西南、“三江”构造带南延部分;其成矿母岩是沿断裂带分布的中酸性侵入岩,REE 的富集多与中—晚期侵入的岩浆岩有关;岩性为黑云母二长花岗岩、黑云钾长花岗岩、二云二长花岗岩和碱性正长岩等;岩石发生不同程度的蚀变,主要为硅化、绿泥石化、绿帘石化、钾长石化、绢云母化和钠长石化等;岩体年龄集中分布于 208～240Ma 和 52～80Ma 两个区间;LREE 型和 HREE 型基岩在年龄上并无规律可循;基岩 REE 的含量多大于 150×10^{-6},岩石具有高硅高碱的特征,相对富集 LREE;与 HREE 富集有关的基岩主要是黑云母二长花岗岩和二云二长花岗岩,相比 LREE 型,HREE 型花岗岩的主要特征是大量(绢)白云母化、萤石化、碳酸盐化和重稀土化的出现;(绢)白云母多呈片状、鳞片状岩沿矿物解理交代斜长石和黑云母;萤石和碳酸盐多呈他形沿矿物的解理面、晶面、孔隙等交代,并伴随有较高的 HREE 矿化的特征,特别是 Y。云南的 iRee 矿床以富集 LREE 为主,HREE 较少;目前所发现的 iHRee 矿床的成矿母岩主要与局部 HREE 异常的 LREE 型花岗岩有关,LREE 型和 HREE 型花岗岩在空间上并未发现明显的界线,这类花岗岩值得重点关注。

基岩中的(含)稀土副矿物是 REE 的主要来源,亦是 iRee 矿床形成不可或缺的物质来源。基岩的交代作用类型和强度的不同决定了稀土矿物的丰富程度;通常情况下,交代作用越强,稀土矿物种类越丰富。基岩中(含)稀土矿物的种类也决定了花岗岩风化壳的类型:榍石、褐帘石、磷灰石、硅铈石和氟碳铈矿等多与 LREE 型稀土矿床有关,这些矿物多为成岩早期的结晶产物,自形程度较好;与 HREE 型矿风化壳有关的稀土矿物主要是富钇钍石、氟碳钙钇矿和氟碳钇矿等,多为晚期分异结晶产物,与萤石

和方解石等矿物共生,常呈他形粒状或不规则状沿矿物解理面、裂隙和孔隙等交代充填;根据稀土矿物在风化作用下的稳定程度,独居石、磷钇矿和褐钇铌矿等矿物因不易解离而以重矿物的形式残留于风化壳中;榍石、磷灰石、褐帘石、萤石和氟碳酸盐矿物等则因易解离成为 iRee 矿床形成的主要物质来源。

云南 iRee 矿床所处海拔均大于 1000m;含矿花岗岩风化壳即为矿体,多呈层状分布;Ree^{3+} 因吸附于黏土矿物而得以保存;黏土矿物以高岭土为主,其次为蒙脱石和伊利石;蛭石和绿泥石等少量,多出现在表土层,半风化层次之;Ree^{3+} 的迁移和吸附、保存受控于风化壳的风化程度,持续、多次、循环的风化作用使 Ree^{3+} 大量迁移和富集,是形成 iRee 矿床的决定性因素。

注　释

❶ 云南省地质矿产局. 1993. 云南省淋积型稀土成矿地质条件及重点矿区开发利用研究报告. 1～35.

❷ 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 273～609.

❸ 云南省地质调查院. 2003. 临沧县幅、滚龙幅 1∶25 万区域地质调查报告. 268～279.

References

Chen Deqian, Wu Jingshu. 1990. The mineralization mechanism of ion-adsorbed REE deposit. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 8(2): 175～179 (in Chinese with English abstract).

Feng Wenjie, Lu Yuxi, Bo Yang. 2016. Large iRee deposit has been found in Yunnan Province. Prospecting Progress, 11(041-042):8～10 (in Chinese with English abstract).

He Xianchuan, Li Yang, Zhang Min. 2016. Analysis on the metallogenic conditions of the ion adsorption type rare earth deposit on the upper and the granite weathering crust in Yunnan. World Nonferrous Metals, 3:117～122 (in Chinese with English abstract).

Huang Dianhao. 1993. Petrology, REE geochemistry and rock-forming mechanism of Zudong and Guangxi granites, Jiangxi. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, (4): 69～94 (in Chinese with English abstract).

Huang Dianhao, Wu Chengyu, Han Jiuzhu. 1988. REE geochemistry and mineralization characteristics of the Zudong and Guanxi granites, Jaingxi Province. Chinese Journal of Geology, 4: 311～328 (in Chinese with English abstract).

Li Mingxiao, Wang Gang. 2017. Study on the processing mineralogy of rare earth ore in Yunnan. Metal Mine, (11): 108～111 (in Chinese with English abstract).

Lu Lei, Wang Denghong, Wang Chenghui, Zhao Zhi, Feng Wenjie, Xu Xiaochun, Yu Feng. 2019. Mineralization regularity of ion-adsorption type REE deposits on Lincang granite in Yunnan Province. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1466～1478 (in Chinese with English abstract).

Peng Touping, Wang Yuejun, Fan Weiming, Liu Dunyi, Shi Yuruo, Miao Laicheng. 2006. SHRIMP ziron U-Pb geochronology of early Mesozoic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang and its tectonic implications. Science in China Series Earth Sciences, 49(10):1032～1042 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong, Yang Jianmin, Yan Shenghao, Xu Jue, Chen Yuchuan, Xue Chunji, Luo Yaonan, Ying Hanlong. 2002. Cenozoic ore concentration areas in the Sanjiang region, SW China: tectonic setting and exploration. Acta Geoscientia Sinica. 23(2):135～140 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Jue, Zou Tianren, Xue Chunji, Luo Junlie, Luo Yaonan, Wu Guangyu, Li Zhiwei, Yu Jinjie, Yan Shenghao, Yang Jianming, Fu Xujie, Fu Xiaofang, Fu Deming, Chu Yingshi, Wei Lin, Li Xiaoyan. 2005. Cenozoic Mineralization in China. Beijing: Geological Publishing House, 510 ～ 551 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong, Chen Yuchuan, Chen Zhenghui, Liu Shanbao, Xu Jianxiang, Zhang Jiaqing, Zeng Zhailin, Chen Fuwen, Li Huaqin, Guo Chunli. 2007. Assessment on mineral resource in Nanling region and suggestion for further prospecting. Acta Geologica Sinica, 81(7): 882～890 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Chen Zhenghui, Li Dexian, Qu Wenjun, Deng Maochun, Fu Xiaofang, Sun Yan, Zheng Guodong. 2013a. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources. Geology in China, 40(2): 361～370 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Zhao Ting, Li Jiankang, Dai Jingjing, Liu Xinxing. 2013b. Progress, problems and research orientation of ion-adsorpotion type rare earth resources. Rock and Mineral Analysis, 32(5): 796 ～ 802 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong, Chen Zhenyu, Huang Fan, Wang Chenghui, Zhao Zhi, Chen Zhenghui, Zhao Zheng, Liu Xinxing. 2014. Discussion on metallogenic specialization of the magmatic rocks and related issues in the Nanling region. Geotectonica et Metallogenta, 38(2): 230～238 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong, Zhao Zhi, Yu Yang, Wang Chenghui, Dai Jingjing, Sun Yan, Zhao Ting, Li Jiankang, Huang Fan, Chen Zhenyu, Zeng Zhailin, Deng Maochun, Zhou Xinyong, Huang Huagu, Zhou Hui, Feng Wenjie. 2017. A review of the achievements in the survey and study of ion-absorption type REE deposits in China. Acta Geoscientica Sinica, 38(03):317～325 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong, Sun Yan, Dai Hongzhang, Guo Weiming, Zhao Zhi, Zhao Ting, Li Jiankang, Wang Chenghui, Huang Fan, Yu Yang, Li Dexian. 2019. Characteristics and exploitation of rare earth, rare metal and rare- scattered element minerals in China. Engineering, 21(1): 119～127 (in Chinese with English abstract).

Wang Hongkun, Du Haibin, Qi Yingchao, Li Yang. 2019. The deposit characteristics study of ion-absorption type ree in west yunnan. world nonferrous metals, 1: 226＋228 (in Chinese with English abstract).

Wu Chengyu. 1988. The study of ion-adsorbed type of rare earth deposits in weathering crust from south Jiangxi and north Guangdong Province. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1 ～ 166 (in Chinese with English abstract).

Wu Chengyu. 1989. Rare earth mineralization in weathering crust—a nonequilibrium process. Mineral Deposits, 8(4):85～90 (in Chinese with English abstract).

Wu Chengyu, Huang Dianhao, Guo Zhongxun. 1989. REE geochemistry in the weathering process of granites in Longnan County, Jiangxi Province. Acta Geologica Sinica, 63(4): 349～362 (in Chinese with English abstract).

Wu Chengyu, Huang Dianhao, Bai Ge, Ding Xiaoshi. 1990. Differentiation of rare earth elements and origin of granitic rocks, Nanling Mountain area. Acta Petrologica et Mineralogica, 9(2): 106～116 (in Chinese with English abstract).

Wu Chengyu, Bai Ge, Huang Dianhao, Zhu Zhengshu. 1992. Characteristics and significance of HREE-rich granitoids of the Nanling mountain area. Bulletin of the Chinese Academy of

Geological Sciences, (25): 43～58 (in Chinese with English abstract).

Yang Yueqing, Hu Chongsheng, Luo Zhanming. 1981. Geological characteristic of mineralization of rare earth deposit of the ion-absorption type and their prospecting direction. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 2(1):102～118 (in Chinese with English abstract).

Zeng Kai, Li Langtian, Zhu Xiangping, Xia Bin. 2019. TheMetallogenic regularity and prospecting potential of rare-earth deposits of ion-adsorbent type in the Mengwang - Manmai area, western Yunnan. Geology and Exploration, 55(1):19～29 (in Chinese with English abstract).

Zhang Bin, Zhu Xiangping, Pan zewei, Yang Qingbiao, Luo Jianhong. 2019. There are new iREE deposits found in Tengchong-Longchuan aera of Yunnan. The Sound of Nature Resorce. https://mp.weixin.qq.com/s/PR8rjpPGOXW9dnE4UZPK1Q (in Chinese).

Zhao Zhi, Wang Denghong, Chen Zhenyu, Guo Naxin, Liu Xinxing, He Hanhan. 2014. Metallogenic specialization of rare earth mineralized igneous rocks in theeastern Nanling region. Geotectonica et Metallogenia, 38(2): 255～263 (in Chinese with English abstract).

Zhao Zhi, Wang Denghong, Liu Xinxing, Zhang Qingwei, Yao Ming, Gu Wenao. 2015. Geochemical features of rare earth elements in different weathering stage of the Guangxi Huashan granite and its influence factors. Chinese Rare Earth, (3):14～20 (in Chinese with English abstract).

Zhao Zhi, Wang Denghong, Chen Zhenghui, Chen Zhenyu. 2017. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources. Acta Geologica Sinica. 91(12): 2814～2827 (in Chinese with English abstract).

Zhao Zhi, Wang Denghong, Wang Chenghui, Wang Zhen, Zou Xinyong, Feng Wenjie, Zhou Hui, Huang Xinpeng, Huang Huagu. 2019. Progress in prospecting and research of ion-adsorption type REE deposits. Acta Geologica Sinica, 96(6): 1454～1465 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

陈德潜,吴静淑. 1990. 离子吸附型稀土矿床的成矿机制. 中国稀土学报,8(2): 175～179.

冯文杰, 卢玉喜, 柏杨. 2016. 云南发现大型离子吸附型稀土矿. 找矿进展. 11(041-042):8～10.

何显川, 李杨, 张民. 2016. 云南上允花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿床成矿条件浅析. 世界有色金属, 3:117～122.

黄典豪. 1993. 江西足洞和关西花岗岩的岩石学、稀土元素地球化学及成岩机制. 地球学报, (4):69～94.

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地球化学及矿化特征. 地质学报, (4):311～328.

李明晓, 王刚. 2017. 云南某稀土矿石工艺矿物学研究. 金属矿山, (11):108～111.

陆蕾,王登红,王成辉,赵芝,冯文杰,徐晓春,于沨. 2019. 云南临沧花岗岩中离子吸附型稀土矿床的成矿规律. 地质学报. 93(6): 1466～1478.

彭头平,王岳军,范蔚茗,刘敦一,石玉若,苗来成. 2006. 澜沧江南段早中生代酸性火成岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及构造意义. 中国科学:地球科学, 36(2):123～132.

王登红, 杨建民, 闫升好, 徐珏, 陈毓川, 薛春纪, 骆耀南, 应汉龙. 2002. 西南三江新生代矿集区的分布格局及找矿前景. 地球学报. 23(2):135～140.

王登红, 陈毓川, 徐珏, 邹天人, 薛春纪, 罗君烈, 骆耀南, 伍广宇, 李志伟, 余金杰, 闫升好, 杨建民, 傅旭杰, 付小方, 傅德明, 楚萤石, 魏琳, 李晓焰. 2005. 中国新生代成矿作用. 北京:地质出版社,1～853.

王登红, 陈毓川, 陈郑辉, 刘善宝, 徐建祥, 张家菁, 曾载淋, 陈富文, 李华芹, 郭春丽. 2007. 南岭地区矿产资源形势分析和找矿方向研究. 地质学报, 81(7):882～890.

王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 代晶晶, 陈郑辉, 李德先, 屈文俊, 邓茂春, 付小方, 孙艳, 郑国栋. 2013a. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述. 中国地质, 40(2):361～370.

王登红, 赵芝, 于扬, 李建康, 代晶晶, 刘新星, 何晗晗. 2013b. 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.

王登红, 陈振宇, 黄凡, 王成辉, 赵芝, 陈郑辉, 赵正, 刘新星. 2014. 南岭岩浆岩成矿专属性及相关问题探讨. 大地构造与成矿学, 38(2):230～238.

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新进展. 地球学报, 38(03):317～325.

王登红, 孙艳, 代鸿章, 郭唯明, 赵芝, 赵汀, 李建康, 王成辉, 黄凡, 于扬, 李德先. 2019. 我国"三稀矿产"的资源特征及开发利用研究. 中国工程科学. 21(1): 119～127.

王宏坤, 杜海斌, 漆颖超, 李杨. 2019. 滇西离子吸附型稀土矿床特征研究. 世界有色金属, 1:226+228.

吴澄宇. 1988. 赣南粤北地区风化壳离子吸附型稀土矿床研究. 中国地质科学院, 1～166.

吴澄宇. 1989. 风化壳稀土成矿作用———一种不平衡过程. 矿床地质, 8(4):85～90.

吴澄宇, 黄典豪, 郭中勋. 1989. 江西龙南地区花岗岩风化壳中稀土元素的地球化学研究. 地质学报, (4):349～362.

吴澄宇, 黄典豪. 1990. 南岭花岗岩类起源与稀土元素的分馏. 岩石矿物学杂志, (2):106～116.

吴澄宇, 白鸽, 黄典豪, 朱正书. 1992. 南岭富重稀土花岗岩类的特征和意义. 地球学报, (25)43～58.

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. 中国地质科学院矿床地质研究所文集(2).

曾凯, 李朗田, 祝向平, 夏斌. 2019. 滇西勐往—曼买地区离子吸附型稀土矿成矿规律与找矿潜力. 地质与勘探, 55(1):19～29.

张彬, 祝向平, 潘泽伟, 杨清彪, 罗建宏. 2019. 云南腾冲—陇川地区新发现一批中-大型离子吸附型稀土矿,助推滇西成为我国新的稀土矿资源基地. 自然资源之声. https://mp.weixin.qq.com/s/PR8rjpPGOXW9dnE4UZPK1Q

赵芝, 王登红, 陈振宇, 郭娜欣, 刘新星, 何晗晗. 2014. 南岭东段与稀土矿有关岩浆岩的成矿专属性特征. 大地构造与成矿学, 38(2):255～263.

赵芝, 王登红, 刘新星, 张青伟, 姚明, 顾文鳌. 2015. 广西花山岩体不同风化阶段稀土元素特征及其影响因素. 稀土, (3):14～20.

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. 地质学报, 91(12):2814～2827.

赵芝,王登红,王成辉,王臻,邹新勇,冯文杰,周辉,黄新鹏,黄华谷. 2019. 离子吸附型稀土找矿及研究新进展. 地质学报,93(6): 1454～1465.

The metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in Yunnan Province

LU Lei[1,2)], WANG Denghong[*1)], WANG Chenghui[1)], ZHAO Zhi[1)], FENG Wenjie[3)], XU Xiaochun[2)], CHEN Chen[1)], ZHONG Hairen[4)]

1) *MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

2) *School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei*, 230009;

3) *Yunnan Geological Survey Bureau, Kunming*, 650051;

4) *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience, Beijing* 100083

* *Corresponding author: wangdenghong@vip.sina.com*

Abstract

The Ion-adsorption type rare earth (iRee) deposits in Yunnan Province are mainly distributed in the southwest where the altitude is higher than 1000m, and thus are different from the Nanling range in China. The main bedrock types are monzogranite and moyite distributed along the Sanjiang fault. Zircons from the parent rock of iRee deposits yield a concordant U-Pb age ranging from 208～240 Ma to 52～80 Ma. Based on the LREE/HREE ratio, the bedrocks are divided into two types: light rare earth (LREE: La-Eu) type and heavy rare earth (HREE: Gd-Yb+Y) type. The LREE type rocks with partially enriched HREE deserve more attention as they may become an important resource for the ion-adsorption type of HREE (iHREE) deposit. REE-bearing minerals play a decisive role towards contribution to REE in parent rocks. There are few REE in plagioclase, biotite and amphibole, whereas REE-bearing accessory minerals contribute abundant REE to REE-rich rocks. The type and intensity of metasomatism in the bedrock determines the categories of REE-rich minerals. Most of the LREE-rich minerals such as allanite, apatite, monazite, britholite, bastnaesite andcerfluorite tend to be enriched in the early stages. The HREE-rich stage builds stronger complexes with fluoride and carbonate relative to LREE at ambient temperature, thereby increasing the concentration of the HREE and crystalized minerals like xenotime, yttrocrasite, yttrofluorite and Bastnaesite-(Y). Dissolution of different minerals in the weathering crust would result in a different type of deposit. The former, previously enriched in LREE, tend to subsequently be enriched in HREE. The weathering crust can be divided into detrital, clay,and accessory minerals. REE-bearing clay is the ore. It is generally accepted that the REE were mobilized and fractionated during intense weathering of the REE-rich granite in low altitudes where the continuous and repeated weathering under warm and humid conditionsplayed an important role.

Key words: REE; Yunnan; iREE type deposit; REE minerals