

doi: 10.12029/gc20220112

张民,何显川,谭伟,马灵涯,赵甫峰. 2022. 云南临沧花岗岩离子吸附型稀土矿床地球化学特征及其成因讨论[J]. 中国地质, 49(1): 201-214.
Zhang Min, He Xianchuan, Tan Wei, Ma Lingya, Zhao Fufeng. 2022. Geochemical characteristics and genesis of ion-adsorption type REE deposit in the Lincang granite, Yunnan[J]. Geology in China, 49(1): 201-214(in Chinese with English abstract).

云南临沧花岗岩离子吸附型稀土矿床地球化学特征及其成因讨论

张民^{1,2},何显川³,谭伟²,马灵涯²,赵甫峰⁴

(1. 四川旅游学院,四川 成都 610100;2. 中国科学院广州地球化学研究所,中国科学院矿物学与成矿学重点实验室,广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室,广东 广州 510640;3. 四川省冶金地质勘查院,四川 成都 610057;4. 成都理工大学地球科学学院,四川 成都 610059)

摘要:【研究目的】临沧花岗岩风化壳广布,离子吸附型稀土资源潜力巨大。加强对临沧花岗岩风化壳离子吸附型稀土相态特征、浸出率等矿床地球化学特征和成矿机制的研究有利于进一步促进该区离子吸附型稀土资源的找矿工作。【研究方法】本文选择临沧花岗岩中段地区,通过系统实施钻探工程,详细了解稀土成矿地质及矿床地球化学特征,并对其成因进行探讨。【研究结果】临沧花岗岩风化壳全风化层稀土全相及浸出相稀土元素分异强烈,配分曲线呈右倾平滑的“W”型,稀土矿石类型为轻稀土元素富集的混合型稀土矿;稀土矿体赋存在花岗岩风化壳的全风化层,品位变化由上至下呈现出“上低一下高”和“上高一下低”两种类型。【结论】下渗的酸性溶液携带从花岗岩副矿物中解离出来的稀土离子向下运移,在风化壳的全风化层富集成矿,由于半风化层和弱风化层黏土矿物和酸性溶液的急剧减少,稀土元素富集程度大大降低。

关键词:花岗岩;离子吸附型稀土矿;浸出特征;垂直变化特征;成矿机制及成矿模型;矿产勘查工程;临沧;云南
创新点:临沧花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿浸出特征表明,浸出率稳定在 55%~75%;建立该区离子吸附型稀土矿成矿机制及成矿模型。

中图分类号:P618.7 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)01-0201-14

Geochemical characteristics and genesis of ion-adsorption type REE deposit in the Lincang granite, Yunnan Province

ZHANG Min^{1,2}, HE Xianchuan³, TAN Wei², MA Lingya², ZHAO Fufeng⁴

(1. Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, Sichuan, China; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences; CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny; Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. Sichuan Metallurgical Geological Exploration Institute, Chengdu 610057, Sichuan, China; 4. Institute of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

收稿日期:2019-10-16;改回日期:2019-12-17

基金项目:广东省基础与应用基础研究重大项目(2019B030302013)、广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室 2020 年度开放基金(广东省科技计划项目)(2020B1212060055)及中国地质调查局项目(DD20160016-19)联合资助。

作者简介:张民,男,1986 年生,硕士,工程师,从事矿床地球化学研究及固体矿产勘查等工作;E-mail: zhangmin1179@126.com。

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The widespread Lincang granite weathering crust has the enormous potential of ion-adsorption type REE resource. Strengthening the research on the phase characteristics and leaching rate of ion-adsorption type REE deposit in Lincang granite weathering crust and other ore deposit geochemical characteristics and metallogenic mechanisms will help to further promote the prospecting of ion-adsorbed rare earth resources in this area. **[Methods]** Through systematic drilling projects in the middle section of Lincang granite, a detailed understanding of rare earth metallogenic geology and ore deposit geochemical characteristics, and its genesis are discussed. **[Results]** All-phase and leaching-phase of REE in the full weathering layer of crust are strongly differentiated, their distribution patterns show "W" shapes as smooth and shallow; the ores are the mixed type of LREE-enriched; REE ore bodies lay in the full weathering layer of granite weathering crust, and grade changes from top to bottom show two types as "low-high" and "high-low". **[Conclusions]** The infiltrating acidic solution carries the REE which dissociate from the sub-minerals of granite migrating down, the REE enrich and mineralize in the full weathering layer of crust, because the clay minerals and acidic solutions declined sharply, the enrichment of half weathered layer and weak weathered layer are greatly reduced.

Key words: granite; ion-adsorption type rare earth deposits; leach characteristic; vertical variation characteristics; metallogenic mechanism and model; mineral exploration engineering; Lincang; Yunnan Province

Highlights: The leaching characteristics of ion-adsorption type REE deposit in Lincang granite weathering crust show that the leaching rate is stable at 55%–75%; Establish the metallogenic mechanism and metallogenic model of ion-adsorption type REE deposit.

About the first author: ZHANG Min, male, born in 1986, master, geological engineer, engaged in mineral deposit geochemistry research and solid mineral exploration; E-mail: zhangmin1179@126.com.

Fund support: Supported by Guangdong Major Project of Basic and Applied Basic Research(No. 2019B030302013); the 2020 open fund of Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Physics and Materials (Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China)(No. 2020B1212060055); Investigation and Evaluation of Fubang Rare Earth Mine in Lancang, Yunnan (DD20160016–19) about Chengdu Center of China Geological Survey.

1 引 言

在风化壳离子吸附型稀土资源中,稀土元素主要以4种相态存在,离子相、矿物相、胶态沉积相和水溶相(Henderson, 1984; 池汝安等, 1996, 2006, 2007; Ruan et al., 2005; Chi et al., 2005, 2006; Tian et al., 2010, 2011)。其中全相是指上述4种相态之和,指矿石中稀土元素氧化物含量的总和;浸出相是指矿石在盐类溶液中以平衡置换的方式直接浸出来的离子相稀土氧化物含量,浸出相与全相的比值被称为浸出率。对于离子吸附型稀土矿而言,虽然在目前的稀土矿产地质勘查规范中,主要是以全相稀土氧化物来对其进行评价,反映稀土总量的分布状况和总体经济价值;但以现在中国的开采技术条件,主要开采方式为氨盐类溶液的浸矿,浸出相更能真实地反映出可利用的稀土矿床的经济价值(丁嘉榆等, 2013)。当然评价一个离子吸附型稀土矿床,也不能一味只重视浸出率的高低,在目前离子吸附型稀土矿成为中国稀土资源主要开采对象

之一的情况下(王登红等, 2013),要同时结合全相稀土总量的价值,可开采利用的稀土总量的价值以及稀土配分的价值来综合评价一个稀土矿床。

2 地质特征

临沧花岗岩是中国滇西地区出露面积最大的复式岩体,主要形成于晚三叠世,缅泰马陆块与思茅地块碰撞造山过程中的后碰撞阶段(莫玄学等, 1998; 彭头平等, 2006; 孔会磊等, 2012),岩性主体为黑云母二长花岗岩;由于独特的气候条件,临沧花岗岩大部分岩基风化强烈,风化壳广布,迄今该区域已发现初具规模的离子吸附型稀土矿床5处,成矿前景良好。目前对该区离子吸附型稀土矿的研究主要集中在成矿预测、矿床成因、成矿规律等方面(赵汀等, 2014; 刀俊山等, 2017),对该区稀土相态特征、浸出率等矿床地球化学特征和成矿机制的研究几乎是一片空白,因此,笔者通过系统的在研究区施工浅钻,对花岗岩风化壳取样分析,展开本区离子吸附型稀土矿的全相和浸出相稀土配分

特征的对比研究,能够更好地反映本区稀土矿床真实的地球化学特征和矿化富集规律,指导本区离子吸附型稀土资源的找矿工作。

3 样品采集与分析

本文研究区是指北起澜沧县上允镇,南至糯扎渡镇之间约2000 km²的区域(图1),对该区内的晚三叠世黑云母二长花岗岩风化壳的全风化层进行取样分析。本次研究选取了均匀分布且均穿透含矿层的18个钻孔,每个钻孔单个样品的取样长度均为1 m,然后根据每个钻孔的分析结果,在每个钻孔的含矿层中挑选连续且全相稀土总量≥0.05%的样品重新组成1个组合样,充分混匀;为防止组合样受

潮、受污染和物质组分的流失,样品采用内外双层包装,内装塑封袋,外装样品袋,送至自然资源部南昌矿产资源监督检测中心,分别进行全相、浸出相稀土元素及氧化物总量、分量的检测。实验设备及条件为:浸出设备采用HY-2A调速多用振荡器,分析设备采用Agilent7700x电感耦合等离子体质谱仪(D483),温度为1℃,湿度为50%~60%,浸出相由5%的(NH₄)₂SO₄采用柱浸法浸出。

4 成矿特征

4.1 花岗岩风化壳特征

研究区花岗岩风化壳主要发育在平缓山顶、缓山脊、低缓山丘等处,在沟谷内分布较薄,甚至尖

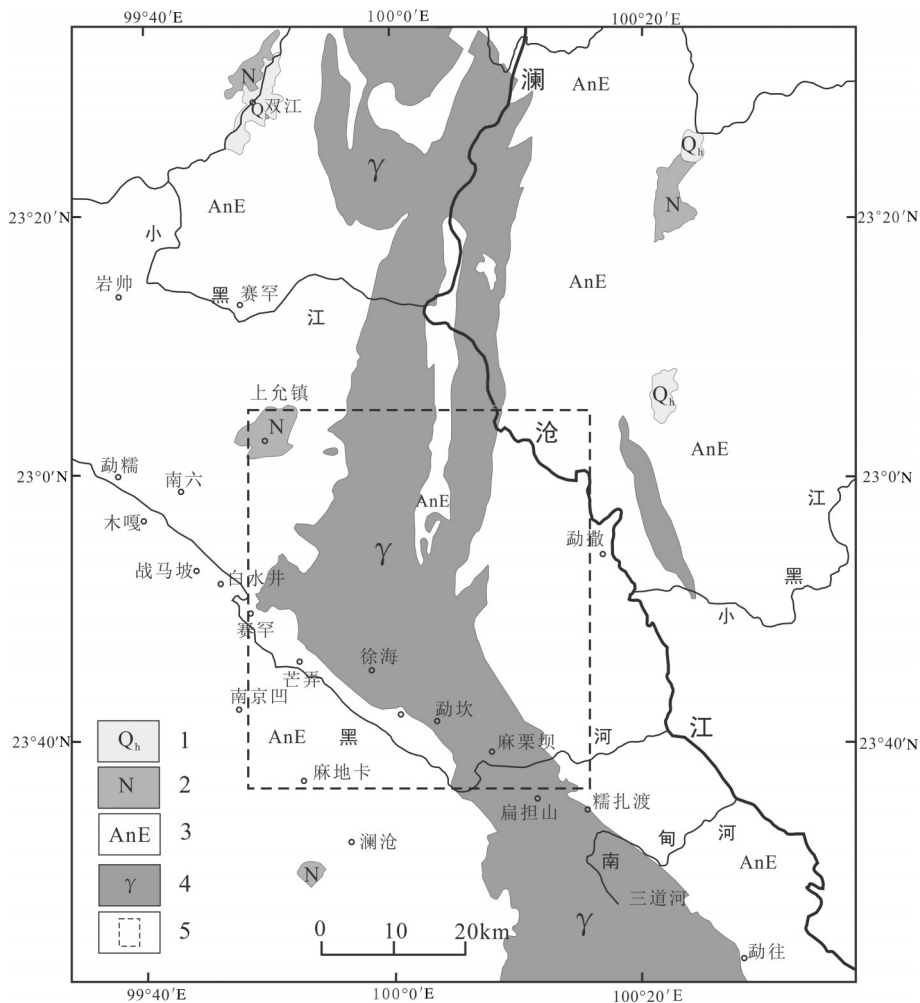


图1 临沧花岗岩中段地质简图(底图据方良好等,2017,略修改)
 1—全新统;2—新近系;3—前新近纪;4—临沧花岗岩;5—研究区范围
 Fig.1 The sketch geological map of the middle section of Lincang granite
 (modified from Fang Lianghao et al., 2017)
 1—Holocene series; 2—Neogene; 3—Pre-Tertiary; 4—Lincang granite; 5—Study area

灭。风化壳全风化层主要为由于成分含量略不同而呈肉红、亮白、灰黄、灰褐、灰白的砂质黏土,结构为粉砂泥质结构、黏土结构、中细粒松散砂质结构,构造为土状构造、块状构造。本区风化壳中黏土矿物种类较多,主要为高岭石、蒙脱石、埃洛石、水云母、三水铝石及少量铁锰氧化物等,尤其以高岭土含量最高,稀土元素多以离子相氧化物的形式分散吸附于次生风化而成的这些黏土矿物中。

研究区花岗岩风化壳根据物质组分及风化程度的不同由地表至基岩依次可分为腐殖土层、亚黏土层、全风化层(强风化层)、半风化层(中等风化层)、弱风化层(微风化层)5个层位(张民等,2018)(图2)。腐殖土层主要为腐殖土,厚度为0~0.5 m,几乎不含稀土元素;亚黏土层主要为少量的石英颗粒、长石碎屑和大量黏土,可塑性、含水性强,厚度为0.5~3 m,几乎不含稀土元素;全风化层为石英、长石、黑云母和其他矿物组成的砂质黏土,厚度为3~29 m;该层黏

土矿物含量达50%~80%,是稀土矿的主要含矿层位。半风化层物质成分与全风化层基本一致,主要区别为风化程度较上层稍差,稀土元素富集程度较差,与全风化层呈渐变过渡;弱风化层风化程度更低,稀土元素基本无富集,厚度一般小于2 m。新鲜基岩为未风化的黑云母二长花岗岩。

研究区花岗岩风化壳存在风化和矿化不均匀的现象,风化不均匀具体表现在不同海拔、不同坡度山之间风化的不均匀,同个山头内部不同空间风化的不均匀等,野外表现为在风化壳中会发现很多的风化球和风化残余体。矿化不均匀具体表现在不同风化壳之间的矿化不均匀,同一风化壳内部不同空间矿化的不均匀以及同一风化壳内部相同空间不同稀土元素矿化的不均匀等,野外表现为同一个山头的南北两面矿化效果就不一样。

4.2 稀土元素配分特征

研究区全相稀土元素组成及相关参数如表1,

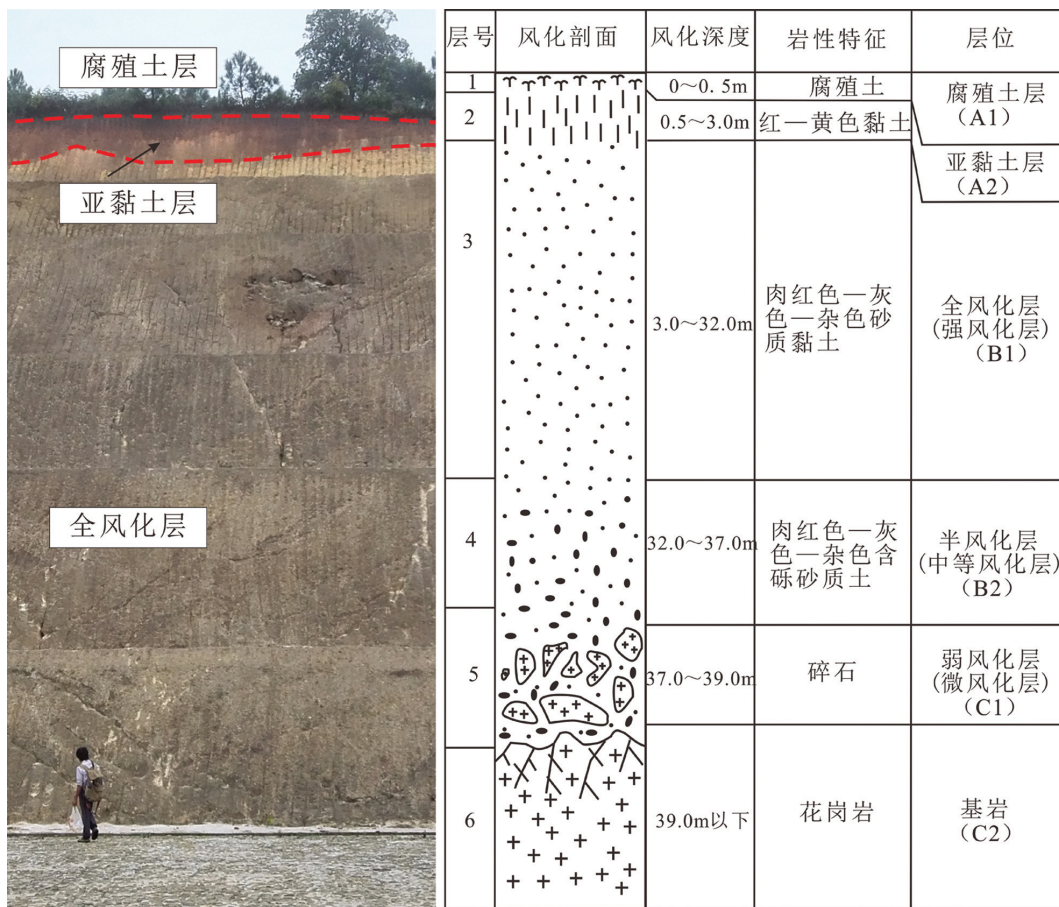


图2 研究区花岗岩风化带分层特征示意图

Fig.2 The stratified features of granite weathering zone in the study area

表 1 全相稀土元素组成及相关参数(10⁻⁶)
Table 1 Composition and related parameters of all-phase REE (10⁻⁶)

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δEu	δCe
ZK09-ZH	292	324	59.8	213	43.3	7.12	39.2	6.97	34.8	7.47	20.8	3.18	17.2	2.54	204	11.75	4.23	1.88	0.52	0.56
ZK16-ZH	220	132	48.5	188	41.4	6.68	34.6	6.19	30.4	6.5	18.2	2.78	15.4	2.28	168	9.89	3.33	1.86	0.52	0.30
ZK13-ZH	156	210	31.6	120	25.4	5	24.8	5.09	27.8	6.32	18	3.03	16.7	2.52	180	6.47	3.85	1.23	0.60	0.68
ZK10-ZH	104	142	21.6	78.4	19.2	1.92	18.5	4.03	23	5.3	15.2	2.4	13	1.94	144	5.54	3.39	1.18	0.31	0.69
ZK07-ZH	138	150	28.1	102	20.6	3.2	19.2	3.54	17.9	3.92	10.9	1.64	8.96	1.3	99.2	10.66	4.20	1.77	0.48	0.55
ZK04-ZH	175	136	35.7	121	27.5	3.1	27	5.56	32	6.75	18.8	2.75	16.3	2.35	203	7.43	3.99	1.37	0.34	0.39
ZK41-ZH	228	162	55.2	198	44	5.52	36.3	6.26	32.9	6.51	17.7	2.56	15.4	2.19	178	10.25	3.25	1.95	0.41	0.34
ZK42-ZH	218	149	48.4	169	35.9	5.41	30.2	5.32	29.2	5.98	16.1	2.29	14.1	1.93	160	10.70	3.81	1.77	0.49	0.34
ZK36-ZH	191	225	43.1	152	32	5.55	27.7	4.77	25.6	5.2	14.1	2.04	12.4	1.7	145	10.66	3.74	1.85	0.55	0.57
ZK27-ZH	118	99.4	26.2	91.4	21.3	2.4	17.1	2.99	16.3	3.34	9.39	1.51	9.84	1.43	91.6	8.30	3.47	1.44	0.37	0.41
ZK33-ZH	119	115	27.2	93.8	21	2.66	18.9	3.55	19.6	4.03	11.1	1.72	10.8	1.44	113	7.63	3.55	1.45	0.40	0.47
ZK19-ZH	104	120	21.4	74.8	16.9	1.84	16.2	3	17.3	3.56	9.84	1.46	9.17	1.24	95.8	7.85	3.86	1.46	0.33	0.58
ZK25-ZH	147	91.4	33.2	113	29.5	2.74	28.3	5.62	32.3	6.9	19.2	2.96	19	2.68	192	5.36	3.12	1.23	0.28	0.30
ZK59-ZH	171	136	35.7	123	27	3.13	23.7	4.24	22.1	4.34	11.7	1.66	10.4	1.44	123	11.38	3.97	1.88	0.37	0.40
ZK61-ZH	106	150	22.6	80	15.9	2.08	13.3	2.15	10.9	2.21	6.06	0.87	5.88	0.84	60	12.48	4.18	1.87	0.42	0.71
ZK53-ZH	142	136	29.8	104	21.8	3.25	18.2	3.12	16.4	3.32	8.92	1.34	8.08	1.12	91.8	12.17	4.08	1.86	0.48	0.48
ZK69-ZH	102	138	21.9	76.1	15.4	2.13	12.9	2.11	11.5	2.42	6.84	1.01	6.51	0.91	66.8	10.85	4.15	1.64	0.45	0.67
ZK67-ZH	98.5	124	21.5	73.8	17.3	1.84	15.8	2.94	16.7	3.51	10	1.59	9.97	1.42	101	6.84	3.57	1.31	0.33	0.62

注:数据由自然资源部南昌矿产资源监督检测中心检测。

∑LREE 为 336.94×10⁻⁶~939.22×10⁻⁶,平均 494.06 × 10⁻⁶; ∑HREE 为 111.00×10⁻⁶~336.16×10⁻⁶,平均为 219.44×10⁻⁶,整个 LREE 和 HREE 都相对于球粒陨石 10 倍以上的富集, LREE/HREE 为 1.35~3.68,平均为 2.35,轻重稀土元素分异强烈,由于 Eu 元素继承了母岩的亏损特征,再加上在风化淋滤的过程中 Ce 元素发生了亏损,因此其稀土配分曲线(图 3a)呈右倾平滑的浅“W”型;HREE 部分分布较为平坦,整体上 Y 含量是 Yb 含量的 5~10 倍。(La/Yb)_N 为

5.36~12.48,平均为 9.24,反映母岩经过风化后轻重稀土元素分异强烈,(La/Sm)_N 为 3.12~4.23,平均为 3.76,显示花岗岩风化后轻稀土元素内部有较强分异,(Gd/Yb)_N 为 1.23~1.95,平均为 1.61,显示花岗岩风化后重稀土元素内部分异程度较低。

浸出相稀土元素组成及相关参数如表 2, ∑SLREE 为 142.17 × 10⁻⁶~426.90 × 10⁻⁶,平均 254.90 × 10⁻⁶; ∑SHREE 为 61.12×10⁻⁶~224.91×10⁻⁶,平均为 147.17 × 10⁻⁶, SLREE/SHREE 为 1.24~2.45,

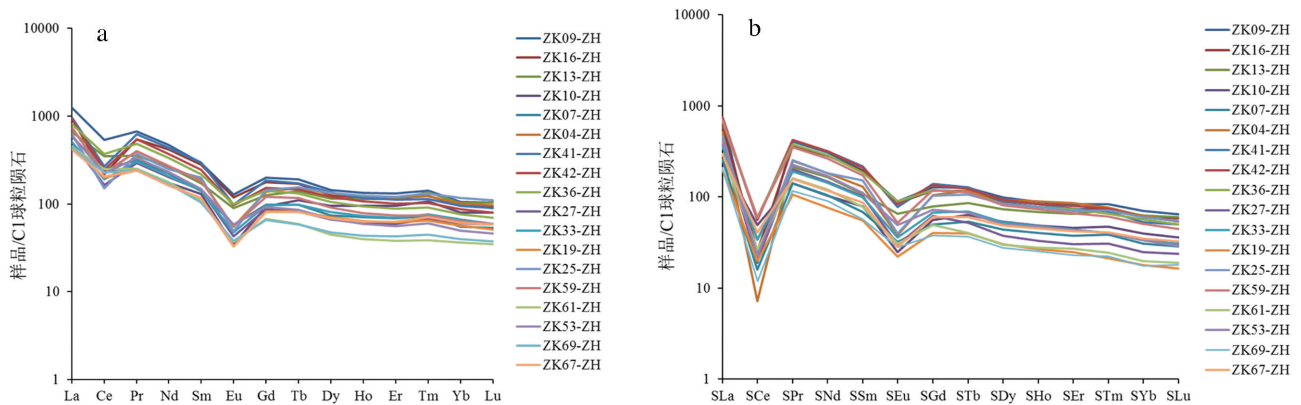


图 3 研究区全相稀土元素(a)和浸出相稀土元素(b)配分曲线
Fig.3 REES' distribution patterns of all-phase (a) and leaching-phase (b)

表2 浸出相稀土元素组成及相关参数(10^{-6})Table 2 Composition and related parameters of leaching-phase REE (10^{-6})

样品编号	SLa	SCe	SPr	SNd	SSm	SEu	SGd	STb	SDy	SHo	SEr	STm	SYb	SLu	SY	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δ Eu	δ Ce
ZK09-ZH	174	11.4	36.4	140	29	5	25.3	4.61	24	4.94	13.2	1.88	11.4	1.58	138	10.57	3.76	1.83	0.55	0.03
ZK16-ZH	139	15.3	32.3	128	28.4	4.8	23	4.18	21.3	4.34	11.6	1.66	9.91	1.42	120	9.71	3.07	1.92	0.55	0.05
ZK13-ZH	89.8	20.6	19.2	74.7	15.9	3.68	15.5	3.14	17.8	3.79	10.4	1.61	10.2	1.46	116	6.10	3.54	1.26	0.70	0.11
ZK10-ZH	58.5	29.7	12.6	47	11.6	1.39	11	2.31	13	2.72	7.26	1.06	6.44	0.87	76.4	6.29	3.16	1.41	0.37	0.25
ZK07-ZH	60.2	9.67	12.6	47.8	10.1	1.8	9.78	1.96	10.7	2.24	5.94	0.87	5.04	0.7	66.2	8.27	3.74	1.60	0.54	0.08
ZK04-ZH	122	4.37	22.4	83.2	19.1	2.14	20.6	4.27	22.7	5.02	13.6	1.72	10.1	1.31	153	8.36	4.00	1.69	0.33	0.02
ZK41-ZH	164	34.5	37.2	145	32	4.33	27.3	4.65	22.2	4.65	11.8	1.55	8.65	1.21	124	13.13	3.21	2.61	0.43	0.10
ZK42-ZH	176	33.6	37.6	144	31	4.7	26.5	4.44	22.6	4.67	12.7	1.66	9.76	1.32	122	12.49	3.56	2.24	0.49	0.10
ZK36-ZH	156	36.4	33.6	130	27.2	5.04	23.6	4.1	20.7	4.31	11.6	1.48	9.27	1.22	113	11.65	3.59	2.10	0.59	0.12
ZK27-ZH	87.5	12.2	18	66.8	14.9	1.68	12.1	1.9	9.11	1.83	4.83	0.69	4.06	0.58	49.1	14.92	3.68	2.46	0.37	0.07
ZK33-ZH	82.2	20.4	17.1	65	14.5	2.01	13.3	2.52	12.8	2.66	6.95	0.9	5.47	0.75	72	10.40	3.55	2.01	0.43	0.12
ZK19-ZH	46.6	11.9	9.47	34.6	8.14	1.24	7.93	1.44	7.42	1.48	3.94	0.48	2.92	0.4	39.6	11.05	3.59	2.24	0.46	0.13
ZK25-ZH	109	13.8	22.7	82.3	22.5	2.24	20.2	3.84	20.5	4.33	11.2	1.6	9.75	1.32	114	7.74	3.04	1.71	0.31	0.06
ZK59-ZH	163	35.6	31.6	120	25.4	2.93	23.3	4.07	19.7	4.08	10.6	1.37	8.2	1.09	109	13.76	4.02	2.35	0.36	0.11
ZK61-ZH	69.4	15.8	14.4	55.1	11.4	1.72	9.64	1.46	7.27	1.54	4.28	0.55	3.2	0.46	40.1	15.02	3.82	2.49	0.49	0.11
ZK53-ZH	97.6	13.6	20.2	76.8	16.4	2.78	14.2	2.46	12.1	2.62	6.91	0.91	5.42	0.71	70	12.47	3.73	2.17	0.54	0.07
ZK69-ZH	48.9	7.21	10.4	40.6	8.47	1.58	7.4	1.33	6.74	1.41	3.64	0.5	2.86	0.44	36.8	11.84	3.62	2.14	0.59	0.07
ZK67-ZH	68.8	24.6	14.1	52.9	12.8	1.59	11.8	2.19	11.8	2.52	6.69	0.92	5.65	0.79	66.4	8.43	3.37	1.73	0.39	0.18

注:数据由自然资源部南昌矿产资源监督检测中心检测。

平均为1.77,轻重稀土元素有分异。Eu呈现出负异常,Ce呈现出强烈负异常,因此稀土配分曲线(图3b)呈右倾平滑的深“W”型;HREE部分分布较为平坦,整体上SY含量是Yb含量的5~10倍。 $(SLa/SYb)_N$ 为6.10~15.02,平均为10.68,反映了经过盐类溶液浸出之后,轻重稀土元素分异强烈, $(SLa/SSm)_N$ 为3.04~4.02,平均为3.56, $(SGd/SYb)_N$ 为1.41~2.49,平均为2.00,显示经过盐类溶液浸出之后轻重稀土元素内部组分有强烈的分异。

4.3 稀土元素浸出特征

研究区稀土单元素浸出率相关参数如表3,样品中La~Y的平均浸出率为13.46%~77.03%,总体浸出率平均为55.37%,除了Ce元素由于亏损导致浸出率低,呈现出极端值外,其他14个元素的浸出率大都稳定在55%~75%,总体平均为66.93%。从样品单元素浸出率分布曲线(图4)可以看出,样品ZK59的单元素浸出率最高(除Ce元素外),为75.69%~98.31%,平均值为90.20%,样品ZK19的单元素浸出率最低(除Ce元素外),为31.84%~67.39%,平均值为43.62%;从每件样品单元素来看,在LREE中,Nd、Sm、Eu的浸出率较高,在HREE元素中,Gd、Tb、Y的浸出率较高,从图4可以看出,每

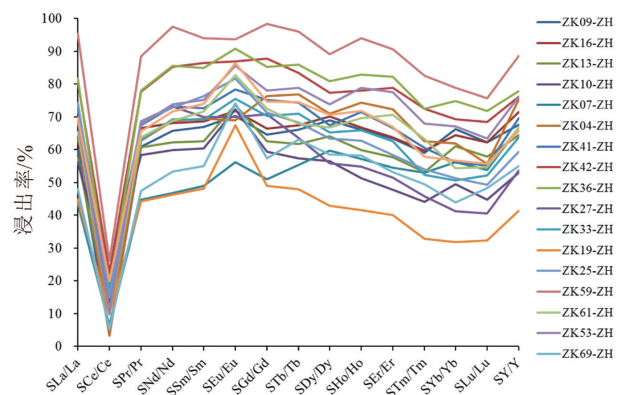


图4 样品单元素浸出率分布图

Fig.4 The distribution curve of each element leaching rate of the samples

件样品(Ce元素除外)轻重稀土元素浸出率呈现出整体较高或整体较低,浸出率的分布曲线都成相对平滑的右倾式,在相同的浸出条件下,除Ce外,轻稀土浸出率是略高于重稀土。

各稀土全相、浸出相稀土氧化物分量占总量的百分比见图5,从图中可知,全相稀土中,LREE($\sum(La_2O_3 \sim Nd_2O_3)$)占稀土总量的52.36%~74.68%,平均为63.93%, La_2O_3 和 CeO_2 所占比重最大,其中 La_2O_3 稍大于 CeO_2 ;MREE($\sum Sm_2O_3 \sim$

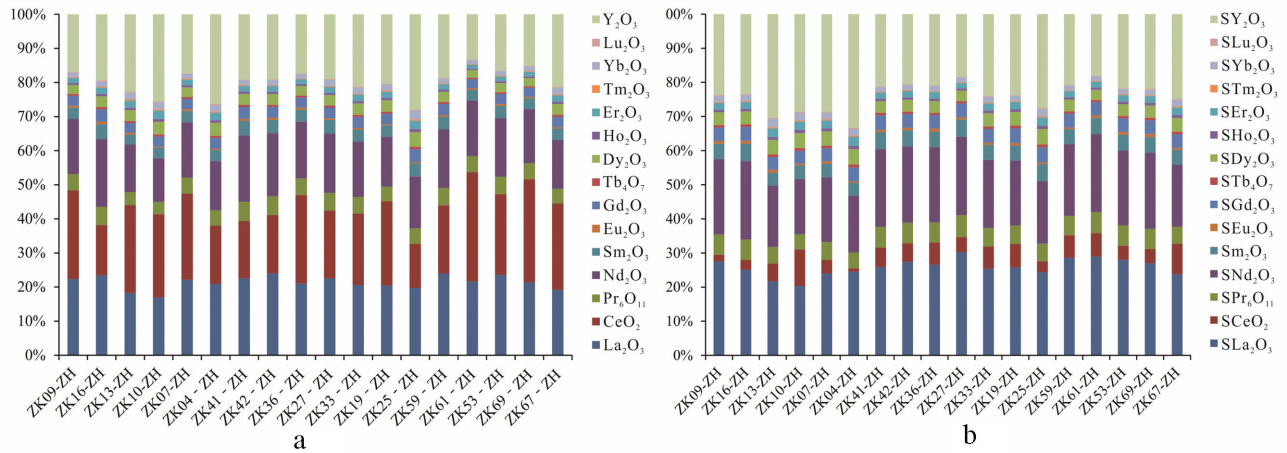


图5 样品全相(a)和浸出相(b)稀土氧化物百分比分布柱状图
Fig.5 The percentage histogram of all-phase (a) and leaching-phase (b) of the REE oxides

Ho₂O₃)占稀土总量的8.49%~13.94%，平均为11.35%，Sm₂O₃、Gd₂O₃、Dy₂O₃所占比重稍大，其中Eu₂O₃的比重为0.35%~0.70%，平均为0.47%；HREE(∑Er₂O₃~Y₂O₃)占稀土总量的15.97%~33.70%，平均为23.53%，其中Y₂O₃所占比重最大，为13.26%~26.36%，平均为19.63%。

浸出相稀土中，LREE(∑La₂O₃~Nd₂O₃)占稀

土总量的49.75%~64.88%，平均为57.17%，La₂O₃和Nd₂O₃所占比重最大，其中La₂O₃稍大于Nd₂O₃；MREE(∑Sm₂O₃~Ho₂O₃)占稀土总量的13.56%~16.18%，平均为14.52%，Sm₂O₃、Gd₂O₃、Dy₂O₃所占比重稍大，其中Eu₂O₃的比重为0.48%~0.88%，平均为0.67%；HREE(∑Er₂O₃~Y₂O₃)占稀土总量的21.55%~38.59%，平均为28.31%，其中Y₂O₃所占比

表3 稀土单元素浸出率组成及相关参数(%)

Table 3 Composition of single element of leaching rate and related parameters (%)

样品编号	SLa/La	SCe/Ce	SPr/Pr	SNd/Nd	SSm/Sm	SEu/Eu	SGd/Gd	STb/Tb	SDy/Dy	SHo/Ho	SEr/Er	STm/Tm	SYb/Yb	SLu/Lu	SY/Y	总浸出率
ZK09-ZH	59.59	3.52	60.87	65.73	66.97	70.22	64.54	66.14	68.97	66.13	63.46	59.12	66.28	62.20	67.65	48.34
ZK16-ZH	63.18	11.59	66.60	68.09	68.60	71.86	66.47	67.53	70.07	66.77	63.74	59.71	64.35	62.28	71.43	59.04
ZK13-ZH	57.56	9.81	60.76	62.25	62.60	73.60	62.50	61.69	64.03	59.97	57.78	53.14	61.08	57.94	64.44	48.31
ZK10-ZH	56.25	20.92	58.33	59.95	60.42	72.40	59.46	57.32	56.52	51.32	47.76	44.17	49.54	44.85	53.06	47.21
ZK07-ZH	43.62	6.45	44.84	46.86	49.03	56.25	50.94	55.37	59.78	57.14	54.50	53.05	56.25	53.85	66.73	31.62
ZK04-ZH	69.71	3.21	62.75	68.76	69.45	69.03	76.30	76.80	70.94	74.37	72.34	62.55	61.96	55.74	75.37	59.58
ZK41-ZH	71.93	21.30	67.39	73.23	72.73	78.44	75.21	74.28	67.48	71.43	66.67	60.55	56.17	55.25	69.66	62.66
ZK42-ZH	80.73	22.55	77.69	85.21	86.35	86.88	87.75	83.46	77.40	78.09	78.88	72.49	69.22	68.39	76.25	70.68
ZK36-ZH	81.68	16.18	77.96	85.53	85.00	90.81	85.20	85.95	80.86	82.88	82.27	72.55	74.76	71.76	77.93	64.65
ZK27-ZH	74.15	12.27	68.70	73.09	69.95	70.00	70.76	63.55	55.89	54.79	51.44	45.70	41.26	40.56	53.60	55.27
ZK33-ZH	69.08	17.74	62.87	69.30	69.05	75.56	70.37	70.99	65.31	66.00	62.61	52.33	50.65	52.08	63.72	56.33
ZK19-ZH	44.81	9.92	44.25	46.26	48.17	67.39	48.95	48.00	42.89	41.57	40.04	32.88	31.84	32.26	41.34	35.54
ZK25-ZH	74.15	15.10	68.37	72.83	76.27	81.75	71.38	68.33	63.47	62.75	58.33	54.05	51.32	49.25	59.38	60.23
ZK59-ZH	95.32	26.18	88.52	97.56	94.07	93.61	98.31	95.99	89.14	94.01	90.60	82.53	78.85	75.69	88.62	79.77
ZK61-ZH	65.47	10.53	63.72	68.88	71.70	82.69	72.48	67.91	66.70	69.68	70.63	63.22	54.42	54.76	66.83	48.93
ZK53-ZH	68.73	10.00	67.79	73.85	75.23	85.54	78.02	78.85	73.78	78.92	77.47	67.91	67.08	63.39	76.25	57.84
ZK69-ZH	47.94	5.22	47.49	53.35	55.00	74.18	57.36	63.03	58.61	58.26	53.22	49.50	43.93	48.35	55.09	37.92
ZK67-ZH	69.85	19.84	65.58	71.68	73.99	86.41	74.68	74.49	70.66	71.79	66.90	57.86	56.67	55.63	65.74	56.41

注:总浸出率不等于单元素浸出率的平均值,而是浸出相稀土氧化物总量与全相稀土氧化物总量的比值,数据由自然资源部南昌矿产资源监督检测中心检测。

重最大,为18.11%~33.35%,平均为24.00%;

4.4 稀土元素垂直变化特征

研究区稀土元素全风化层由上至下品位变化主要呈现出两种类型,一种是“上低一下高”型(图6),全相品位和浸出相品位的曲线分布形态也基本一致(图7),以ZK102为代表。此类型的钻孔红黏土层一般为2~3 m,通常在第3~4 m就进入全风化砂质黏土层,在9 m左右进入含矿层,品位在17~21 m达到最高值,矿层厚4~5 m,从23 m以后全相品位逐渐降低至边界品位以下,到30 m左右矿化终止,此类风化壳主要分布在研究区南部风化层堆积保存较好的平缓山顶和山脊上,显著特点是矿体埋深较深,属于全风化层中下部富集型,全相品位高,矿体较薄,浸出率较低,个别地段矿化可以是持续到32 m左右。

另一种类型是“上高一下低”型(图6),全相品位和浸出相品位的曲线分布形态基本一致(图8),以ZK72为典型代表。此类型的钻孔红黏土层一般为1~2 m,通常在第2~3 m就进入全风化砂质黏土层,从6 m左右进入含矿层,在7~9 m矿石全相品位达到最高值,矿层厚4~8 m,15 m以后品位逐渐降低至边界品位以下。此类风化壳主要分布在研

究区北部风化层堆积保存较差平缓山顶和山脊两侧,显著特点是亚黏土层较薄,矿体埋深中等,属于全风化层中上部富集型,全相品位高,矿体较厚,浸出率较高,风化壳在18 m左右失去矿化。依据研究区稀土元素垂直变化特征,再结合本区倾缓山脊、平缓山顶和低缓山丘的地形地貌,建立了本区离子吸附型稀土矿的3种找矿模型(张民等,2018),在此找矿模型的指导下,找矿效果良好,直接为国家提交稀土氧化物资源量60余万t。

5 讨 论

5.1 全相及浸出相稀土元素特征

由全相和浸出相稀土元素特征的分析对比可以得看出,全相和浸出相稀土元素都以轻稀土元素为主,重稀土元素为辅,全相轻稀土元素中以La和Ce为主,重稀土元素中以Y为主;但是在浸出相稀土元素中,轻稀土元素中以La和Nd为主,重稀土元素中仍以Y为主;全相稀土元素 δCe 平均值为0.50,浸出相 δCe 平均值为0.10,这说明浸出相中Ce元素强烈亏损,这是风化作用和浸出作用的“双重功劳”,在风化过程中,从矿物中解离出来的 Ce^{3+} 离子发生了分异选择, Ce^{3+} 发生水解反应形成 Ce^{4+} ,进而

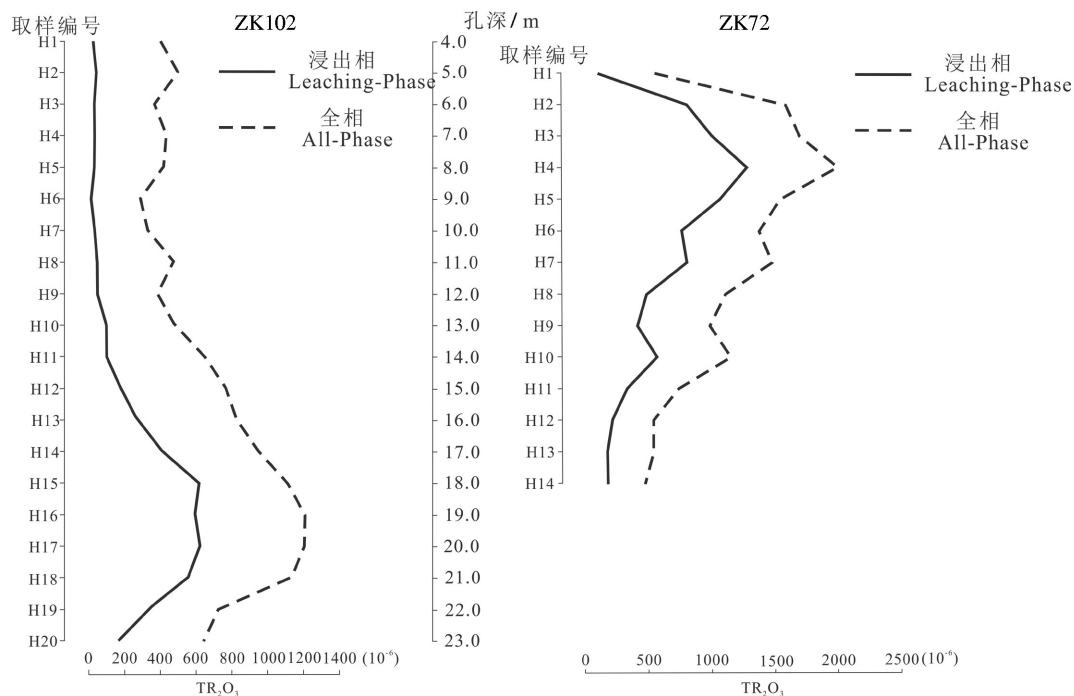


图6 钻孔ZK102及ZK72稀土元素全相和浸出相对比图

Fig.6 Relative diagram of all-phase and leaching phase of REE in the well ZK102 and ZK72

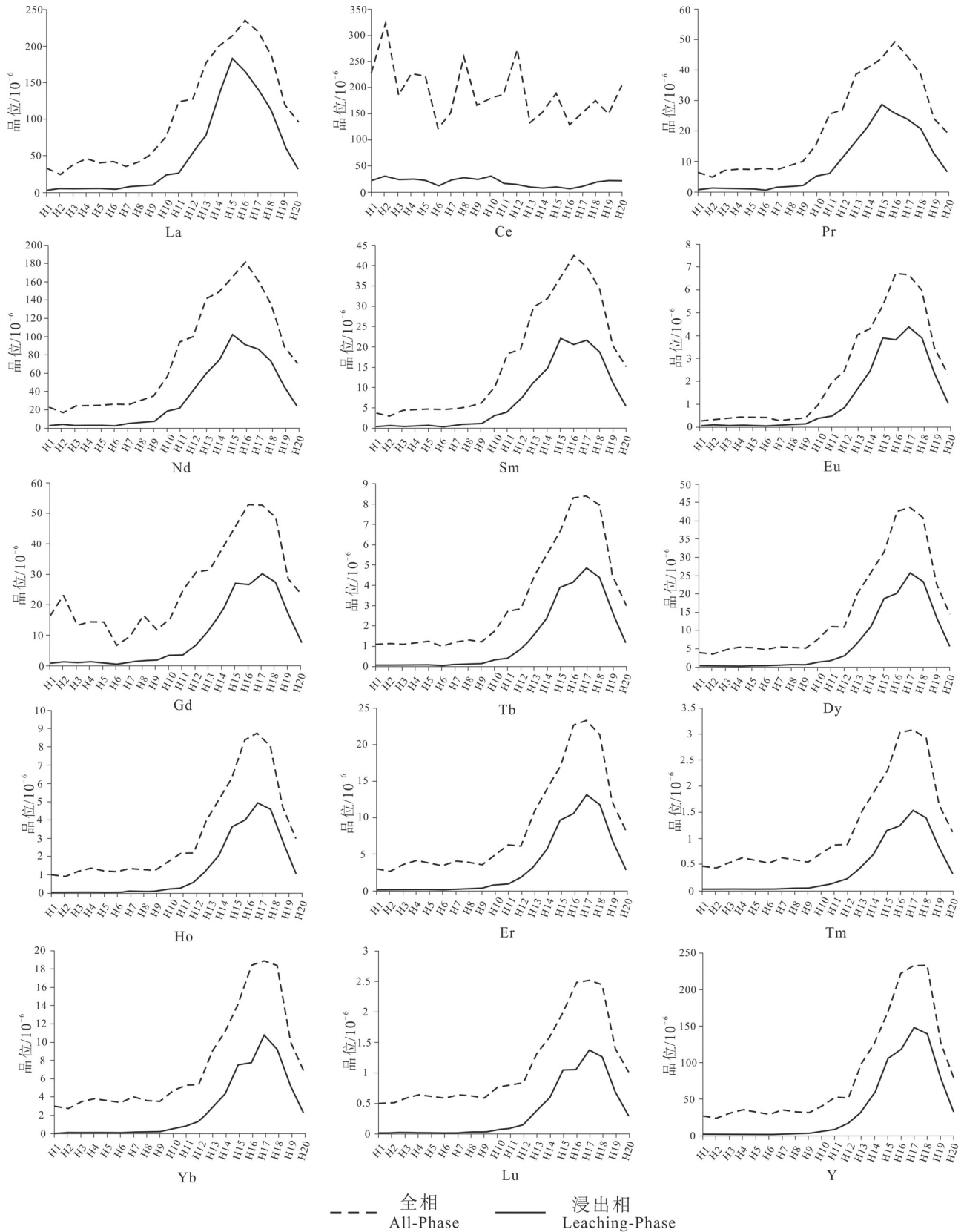


图7 钻孔ZK102稀土单元素全相和浸出相对比图

Fig.7 Comparison diagram of all-phase and leaching phase of single REE from the well ZK102

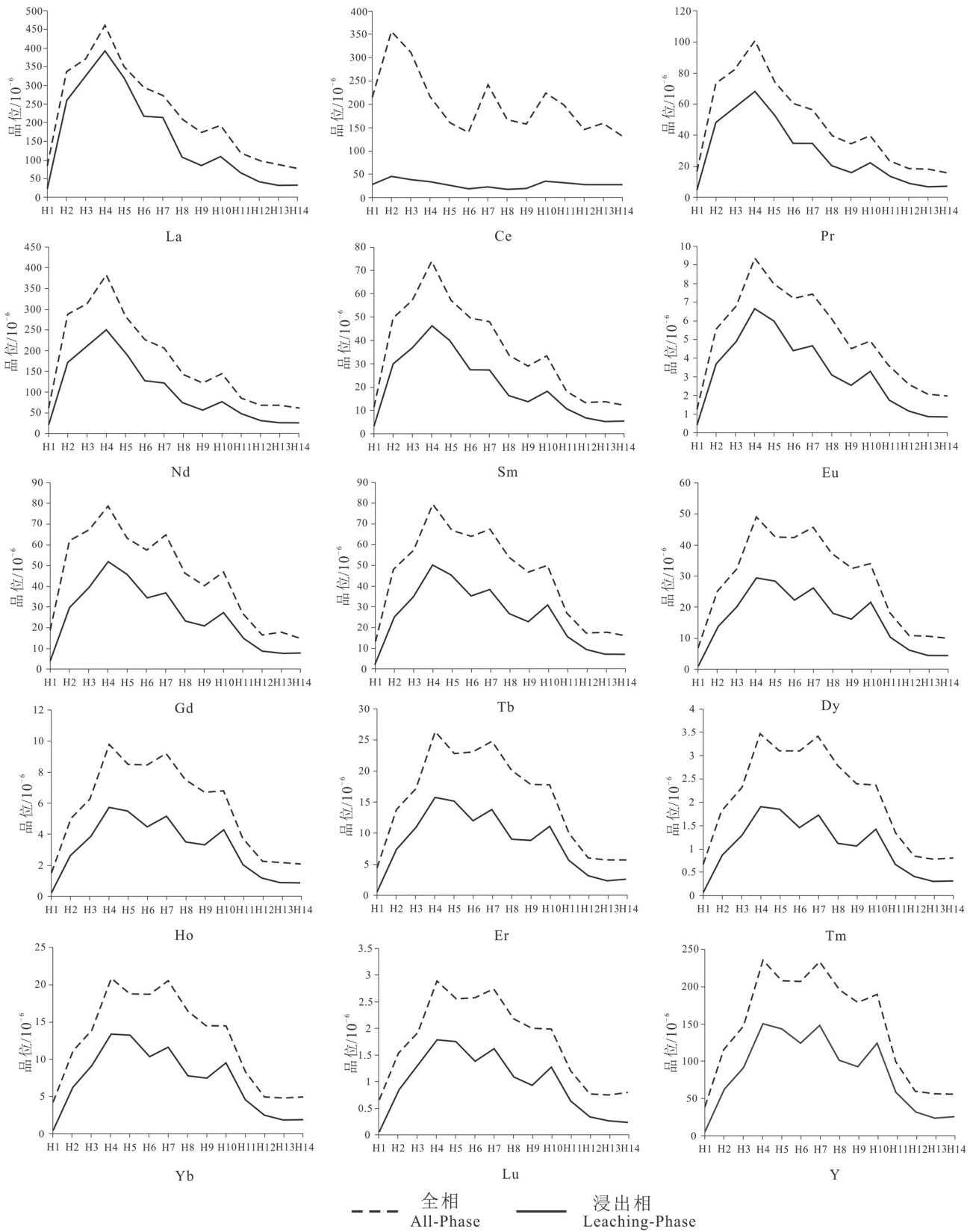


图8 钻孔 ZK72 稀土元素全相和浸出相对比图
 Fig.8 Comparison diagram of all-phase and leaching phase of single REE from the well ZK72

形成Ce的氢氧化物和氧化物而停留在花岗岩全风化层的上部(亚黏土层的下部),因此少量进入到全风化层中部的Ce主要呈矿物相存在,而浸出相的Ce元素首先“继承”了全相时的亏损状态,又经过盐类溶液的浸出作用,发生进一步的分异选择,使得浸出相中Ce元素变得更加亏损。

全相稀土元素LREE/HREE平均为2.35,浸出相稀土元素SLREE/SHREE平均为1.77,这说明一方面风化作用对稀土元素的分异作用大于盐类溶液浸出作用对稀土元素的分异作用,另一方面由于浸出相中Ce元素的进一步亏损,也导致轻稀土元素总量下降,比重降低。全相和浸出相稀土元素配分曲线都成右倾平滑的“W”型,与临沧花岗岩新鲜基岩呈右倾平滑的“V”字型已经发生了巨大的变化,特别是由于浸出相的Ce元素的强烈亏损,使得浸出相的配分曲线呈深“W”型;HREE经过浸出作用分异后,在曲线上表现为倾斜度稍微有所增加。全相稀土元素 δEu 平均值为0.42,浸出相 δEu 平均值为0.47,这说明经过浸出作用后,Eu元素总体变化不大,浸出作用对 δEu 的影响有限。

5.2 稀土矿石类型

稀土矿中,如果轻稀土氧化物含量占90%以上,则为轻稀土型稀土矿;如果中、重稀土氧化物比重占20%~30%,则为中、重稀土型稀土矿;如果重稀土氧化物占90%以上,则为重稀土型稀土矿(钟祥熙,2016)。在《稀土矿产地质勘查规范》(征求意见稿)中,按照稀土配分标准,以 Eu_2O_3 和 Y_2O_3 含量为依据, $\text{Y}_2\text{O}_3 < 20\%$ 为低钇, $20\% \leq \text{Y}_2\text{O}_3 < 40\%$ 为中钇, $\text{Y}_2\text{O}_3 \geq 40\%$ 为高钇; $\text{Eu}_2\text{O}_3 < 0.6\%$ 为低钇, $0.6\% \leq \text{Eu}_2\text{O}_3 < 1.0\%$ 为中钇, $\text{Eu}_2\text{O}_3 \geq 1.0\%$ 为高钇。由稀土元素浸出特征可以看出,本区稀土类型,从全相品位的角度看,是以轻稀土为主,中重稀土齐全的低钇低钇混合型稀土矿;从浸出相的角度看,是典型的中钇中钇、中重稀土混合型稀土矿。

5.3 稀土矿成矿机制及成矿模型

风化壳内部是一个开放的不均匀的动态系统,整个成矿体系就是一个由反复吸附和解吸构成的动态体系,稀土元素在风化作用下是活动的(Nesbitt, 1979; Duddy, 1980; Nesbitt et al., 1992),会产生分异行为,不同稀土元素的迁移能力的差异,是造成稀土元素分异的主要因素(Land et al., 1999;

Taunton et al., 2000; Aubert et al., 2001)。风化壳由上而下每个层位的黏土矿物的含量、酸性溶液pH值特性、氧化作用、微生物活动都不相同(王中刚等, 1989; 吴澄宇等, 1989; Gouveia et al., 1993; Minarik et al., 1998; 陈炳辉等, 2000; 马英军等, 2004),结合稀土离子的成矿特点,全风化层就成为稀土元素主要的“活动”层位,因此,矿体主要富集在全风化层,结合本区稀土元素垂直变化特征(图7和图8)可以看出,第一,研究区稀土单元素自上而下,浸出相与全相的分布曲线基本一致(Ce除外),这说明,每种元素自上而下浸出率基本保持稳定;第二,Ce元素浸出相品位远低于其全相品位,这说明,在全风化层中,离子态的Ce元素很少,这与配分曲线中表现出来的“Ce亏效应”是一致的;第三,Ce元素全相品位曲线的波动非常大,表现为强烈的波折线,整体变化趋势不明显,这说明本区Ce元素的矿化不够稳定;第四,单元素的浸出率与其全相品位呈正相关,全相品位越高,浸出率也随之递增,在矿体中部全相品位最高处,浸出率也最高,然后向矿体顶底板逐渐递减;第五,ZK102的单元素浸出相曲线随着全相品位的增减呈现出平滑上升,急速下降的展布形态,而ZK72的单元素浸出相曲线和全相品位的曲线都呈现出平缓上升,波折下降的展布形态,这说明,以ZK72为代表的矿体全风化层中上部富集型的风化壳,随着风化壳深度的增加,在全风化层的中下部还可能存在一个或多个薄的稀土富集层。

因此,由上可总结出本区离子吸附型稀土矿的成矿模式(图9):第一,大气降水由于地表的腐殖质使得渗入地下的水溶液成弱酸性溶液,这成为携带稀土元素的有效载体。花岗岩由于粒度、结构、组分、风化程度等的不同,经过长期风化之后,形成了腐殖土层、亚黏土层、全风化层、半风化层、弱风化层5个层位,由地表渗入的酸性溶液在这个花岗岩风化壳中成为稀土元素迁移的动力,是稀土离子交换的重要场所,其流向就是稀土元素的迁移方向,其流向决定了稀土元素富集的具体层位。第二,稀土元素从花岗岩副矿物中陆续解离出来,首先, Ce^{4+} 的水解和配位反应都能促使Ce产生不同的异常现象,水解反应可使 Ce^{3+} 形成 Ce^{4+} ,形成氢氧化铈沉淀 $\text{Ce}(\text{OH})_4$,并脱水形成二氧化铈(CeO_2),在稀土离子

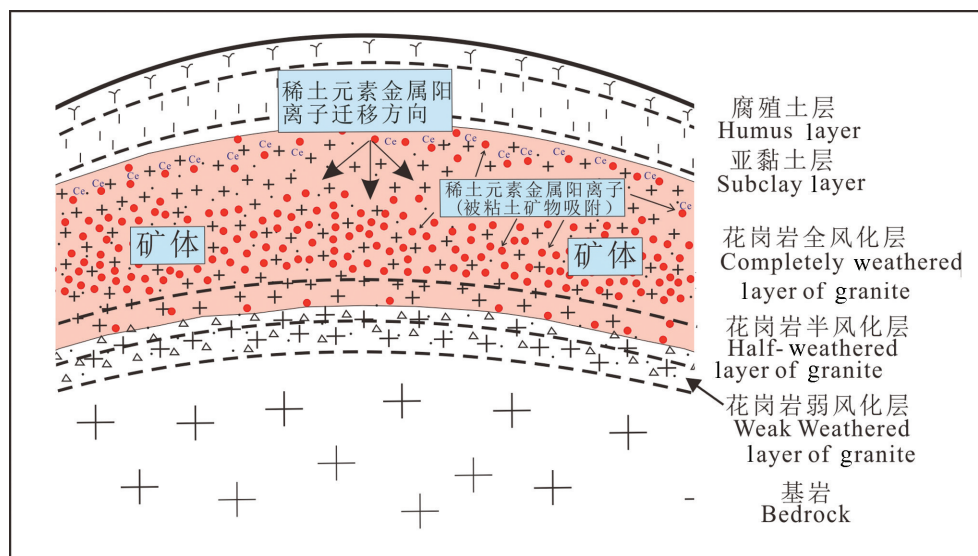


图9 研究区离子吸附型稀土矿成矿模式简图

Fig.9 Metallogenic model of ion-adsorption type REE deposit in the study area

随地下水的迁移中, Ce^{4+} 较早地停止迁移, 与其他轻稀土元素发生分离, 并沉积在全风化层的上部或亚黏土层的下部, 在全风化层中下部和腐殖土层强烈亏损。其次, 由于重稀土元素的原子序数较大, 在相同酸碱条件下, 其迁移能力较强, 向下迁移的速度快于轻稀土元素, 因此, 重稀土元素会富集于全风化层的中下部, 其他轻稀土元素一般富集在重稀土元素之上, Ce 元素之下。第三, 由于强烈的风化作用, 花岗岩的许多造岩矿物被风化成了以高岭土为主的黏土矿物, 酸性溶液携带着稀土离子向下运移的过程中稀土离子被这些黏土矿物所吸附并在全风化层富集成矿。第四, 稀土元素的富集层就是花岗岩的全风化层, 半风化层和弱风化层由于内部应力的逐渐加强, 酸性溶液运移至该层位逐渐减少, 再加上黏土矿物的急剧减少, 无法吸附更多的稀土元素, 导致该层位无法发生更多的稀土元素的富集, 所以这两层不是主要的含矿层。

综上所述: 三叠纪以来, 研究区所在的滇西地区有大规模的黑云母二长花岗岩出露, 其岩石化学特征明显, 轻重稀土分异强烈, 稀土总量高于其他地区同时代的花岗岩, 使它成为离子吸附型稀土矿的天然成矿母岩。研究区又位于北回归线以南, 属于亚热带季风气候, 一年干湿两季明显; 动植物丰富, 腐殖酸较多, 地表渗水酸度较大, 化学风化作用强烈, 使的临沧花岗岩形成了巨厚的风化壳。风化

作用中, 富含稀土元素的矿物被下渗酸性溶液淋滤, 稀土元素以离子的形式被酸性溶液携带向风化壳下部运移, 在花岗岩的全风化层被以高岭土为主的黏土矿物所吸附而富集成矿。

6 结论

通过对临沧花岗岩中段离子吸附型稀土资源野外调查及元素地球化学研究, 得出本区稀土资源的矿床地球化学特征及其成矿机制如下:

(1) 临沧花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿浸出特征表明, 全相和浸出相稀土元素配分曲线都成“W”型, 但浸出相分异更加强烈; 矿石类型为轻稀土元素富集的混合型稀土矿。

(2) 稀土矿体赋存在花岗岩风化壳的全风化层, 品位变化由上至下呈现出“上低一下高”和“上高一下低”两种类型。“上低一下高”型矿体的特点是埋深较深, 矿体较薄, 全相品位高, 浸出率较低; “上高一下低”型矿体的特点是矿体埋深中等, 矿体较厚, 全相品位高, 浸出率较高。

(3) 成矿机制为: 下渗的酸性溶液携带从花岗岩副矿物中解离出来的稀土离子向下运移, 在风化壳的全风化层被黏土矿物吸附并富集成矿。

致谢: 感谢中国地质调查局成都地质调查中心王立全、范文玉、王保弟老师对野外工作的悉心指导与帮助; 感谢匿名审稿专家对提高本文质量提供

的宝贵意见。

References

- Aubert D, Stille P, Probst A. 2001. REE fractionation during granite weathering and removal by waters and suspended loads: Sr and Nd isotopic evidence[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(3): 387–406.
- Chi Ruan, Dai Zuxu, Xu Zhigao, Wu Yuanxin, Wang Cunwen. 2006. Correlation analysis on partition of rare earth in ion-exchangeable phase from weathered crust ores[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16: 1421–1425.
- Chi Ruan, Tian Jun, Li Zhongjun, Peng Cui, Wu Yuanxin, Li Shirong, Wang Cunwen, Zhou Zhiang. 2005. Existing state and partitioning of rare earth on weathered ores[J]. *Journal of Rare Earths*, 23(6): 756–759.
- Chi Ruan, Tian Jun. 2006. *The Weathering Crust Eluviation Type Rare Earth Mineral Chemical Metallurgy*[M]. Beijing: Science Press, 55–63.
- Chi Ruan, Tian Jun. 2007. Review of weathered crust rare earth ore[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 25(6): 641–649(in Chinese with English abstract).
- Chi Ruan, Wang Dianzuo. 1996. The occurrence state of rare earth and selection of separation and enrichment technology in ore[J]. *Rare Metal*, 20(4): 241–245. (in Chinese with English abstract).
- Chen Binghui, Xu Wenlie, Huang Limei, Wu Fuhai, Liu Huhu. 2000. An experimental study on the effects of microbes and organic acids on dissolution of REE in the weathering crust of a granite[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 39(4): 110–113 (in Chinese with English abstract).
- Dao Junshan, Huang Junkun, Jia Kui, Zhang Weizuo. 2017. Analysis of the genesis of ore deposit in Yunnan Province, east of rare earth ion adsorption type[J]. *World Nonferrous Metal*, (3): 194, 196 (in Chinese with English abstract).
- Ding Jiayu, Deng Guoqin. 2013. Main problems in the current ionic adsorption rare earth exploration specifications and their amendment proposals[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 4(4): 96–102(in Chinese with English abstract).
- Duddy I R. 1980. Redistribution and fractionation of rare earth and other elements in a weathering profile [J]. *Chemical Geology*, 30: 363–381.
- DZ/T 0204– 2002. 2002. Specifications for rare earth mineral exploration[S]. 40–41.
- Fang Lianghao, Yuan Daoyang, Shao Yanxiu, He Wengui, Liu Xingwang, Zhang Bo. 2013. Characteristics of Late Quaternary tectonic activity of middle– western segment of Heihe Fault in southwestern part of Yunnan Province[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(2): 342– 353 (in Chinese with English abstract).
- Gouveia M A, Prudencio M I, Figueiredo M O. 1993. Behaviour of REE and other trace and major elements during weathering of granitic rocks, Evora, Portugal[J]. *Chem. Geol.*, 107:293–296.
- Henderson P. 1984. *Rare Earth Element Geochemistry*[M]. Amsterdam: Elsevier, 346–365, 492–494.
- Kong Huilei, Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Wang Shuo, LI Rong, Wang Qiaolin. 2012. Petrogenesis of Lincang granites in Sanjiang area of western Yunnan Province: Constraints from geochemistry, zircon U– Pb geochronology and Hf isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1438– 1452(in Chinese with English abstract).
- Land M, öhlander B, Ingri J, Thunberg J. 1999. Oloid speciation and fractionation of rare earth elements in a spodosol profile from northern Sweden as revealed by sequential extraction[J]. *Chemical Geology*, 160:121–138.
- Ma Yingjun, Huo Runke, Xu Zhifang, Zhang Hui, Liu Congqiang. 2004. REE behavior and influence factors during chemical weathering[J]. *Advances in Earth Science*, 19(1): 87– 94(in Chinese with English abstract).
- Minarik L, Zigova A, Bendl J. 1998. The behaviour of rare earth elements and Y during the rock weathering and soil formation in the Ricany granite massif, central bohemia [J]. *The Science of the Total Environment*, 215(1/2):101–111.
- Mo Xuanxue, Shen Shangyue, Zhu Qinwen, Xu Tongrui, Wei Qirong, Tan Jin, Zhang Shuanglan Cheng Huilan. 1998. *Volcanics– ophiolite and Mineralization of Middle– southern Part in Shanjiang Area of Southwestern China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 44–47 (in Chinese with English abstract).
- Nesbitt H W. 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite [J]. *Nature*, 279: 206–210.
- Nesbitt H W, Wilson R E. 1992. Recent chemical weathering of basalts[J]. *American Journal of Science*, 292:740–777.
- Peng Touping, Wang Yuejun, Fan Weiming, Liu Dunyi, Shi Yurou, Miao Laicheng. 2006. The SHRIMP zircon U– Pb dating of the felsic igneous rocks from southern Lancangjiang and its tectonic implications[J]. *Science in China (Series D)*, 10:123– 132 (in Chinese).
- Taunton A E, Welch S A, Banfield J F. 2000. Microbial controls on phosphate and lanthanide distributions during granite weathering and soil formation[J]. *Chemical Geology*, 169:371–382.
- Tian Jun, Yin Jingqun, Chen kaihong, Rao Guohua, Jiang Mintao, Chi Ruan. 2011. Extraction of rare earths from the leach liquor of the weathered crust elution– deposited rare earth ore with non– precipitation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 98(3/4):125–131.
- Tian Jun CRYJ. 2010. Leaching process of rare earths from weathered crust elution– deposited rare earth ore[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, (5):892–896.
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua, 1989. *Rare Earth Element Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 321– 342(in

- Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jing jing, Chen Zhenhui, Li Dexian, Qu Wenjun, Deng Maochun, Fu Xiaofang, Sun Yan, Zhen Guodong. 2013. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources[J]. *Geology in China*, 40(2): 361-370(in Chinese with English abstract).
- Wu Chengyu, Huang Dianhao. 1989. Ree geochemistry in the weathering process of ganites in Longnan County, Jiangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 63(4):349- 362(in Chinese with English abstract).
- Zhao Ding, Wang Denghong, Wang Zhaozhao, Xiang Jie. 2014. The study on extraction of hyperspectral remote sensing information of ion- adsorbed rare earth deposits in Yunnan- Myanmar area[J]. *Mineral Deposits*, 33(Supp.) : 1205-1206(in Chinese with English abstract).
- Zhong Xiangxi. 2016. The Occurrence Characteristics and Leaching Rules of Different Weathering Degree Rare Earth Ores[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 4- 5(in Chinese with English abstract).
- Zhang Min, LI Yang, He Xianchuan, Feng Junlong, Wang Hongkun, Du Jingang, Wang Shushan. 2018. The mineralization characteristics study of ion- absorption type REE deposits in the middle section of Lincang granite[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 38(4): 37-47(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 池汝安,王淀佐. 1996. 矿石中稀土赋存状态与分选富集工艺选择[J]. *稀有金属*, 20 (4): 241-245.
- 池汝安,田君. 2006. 风化壳淋积型稀土矿化工冶金[M]. 北京:科学出版社, 55-63.
- 池汝安,田君. 2007. 风化壳淋积型稀土矿评述[J]. *中国稀土学报*, 25 (6): 641-649.
- 陈炳辉,徐文烈,黄丽玫,毋福海,刘琥琥. 2000. 微生物及有机酸对风化壳中REE的溶出实验[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 39 (4): 110-113.
- 丁嘉榆,邓国庆. 2013. 现行离子型稀土勘查规范存在的主要问题与修订建议[J]. *有色金属科学与工程*, 4(4): 96-102.
- 刀俊山,黄俊坤,贾奎,张卫座. 2017. 云南省富东离子吸附型稀土矿床成因浅析[J]. *世界有色金属*, (3):194, 196.
- 方良好,袁道阳,邵盐秀,何文贵,刘兴旺,张波. 2013. 滇西南地区黑河断裂中西段晚第四纪构造活动特征[J]. *地震工程学报*, 35(2): 342-353.
- 莫宣学,沈上越,朱勤文,须同瑞,魏启荣,谭劲,张双全,程惠兰. 1998. 三江中南段火山岩-蛇绿岩与成矿[M]. 北京:地质出版社, 44-47.
- 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[J]. *中国科学(D辑)*, 36(2): 123-132.
- 孔会磊,董国臣,莫宣学,赵志丹,朱弟成,王硕,李荣,王乔林. 2012. 滇西三江地区临沧花岗岩的岩石成因:地球化学、锆石U-Pb年代学及Hf同位素约束[J]. *岩石学报*, 28(5): 1348-1452.
- 马英军,霍润科,徐志方,张辉,刘丛强. 2004. 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*, 19(1):87-94.
- 王中刚,于学元,赵振华. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京:科学出版社, 321-342.
- 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. 2013. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J]. *中国地质*, 40(2): 361-370.
- 吴澄宇,黄典豪,郭中勋. 1989. 江西龙南花岗岩风化壳中稀土元素的地球化学研究[J]. *地质学报*, 63(4): 349-362.
- DZ/T 0204-2002. 2002. 稀土矿产地质勘查规范[S]. 40-41.
- 赵汀,王登红,王钊钊,向杰. 2014. 滇缅地区离子吸附型稀土矿高光谱遥感信息提取方法研究[J]. *矿床地质*, 33(增刊):1205-1206.
- 钟祥熙. 2016. 不同风化程度离子型稀土矿赋存特征及浸出规律研究[D]. 赣州:江西理工大学, 4-5.
- 张民,李杨,何显川,冯俊龙,郑瑶,王宏坤,杜金刚,王书山. 2018. 滇西临沧花岗岩中段离子吸附型稀土矿成矿特征研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 38(4):37-47.