

云南省澜沧县离子吸附型稀土矿床地质特征分析与成矿过程探讨*

张民^{1,2}, 谭伟², 何显川³, 赵甫峰⁴, 罗莲英²

(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 云南省澜沧县地处临沧花岗岩的中南段,在其境内发现多地与花岗岩风化壳有关的离子吸附型稀土矿床。文章通过对该区晚三叠世黑云母二长花岗岩风化壳全风化层的剖面及钻孔样品分析,对赋存于花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿床的成矿地质地球化学特征进行研究,探讨其关键成矿过程并总结地形地貌与风化壳和矿体露头的关系。研究表明,黑云母二长花岗岩风化壳分层特征明显,离子吸附型稀土矿体规模及形态严格受风化壳发育程度及微地貌控制;花岗岩风化壳全风化层稀土元素配分曲线呈右倾平滑的浅“W”型,轻稀土元素的分异程度强于重稀土元素;除 Ce 元素外,轻稀土元素的浸出率略高于重稀土元素;矿石类型为以轻稀土元素为主、中重稀土元素配分齐全的混合型稀土矿。通过厘定离子吸附型稀土矿床的关键成矿过程,文章发现内应力、渗透能力、风化程度、黏土矿物含量在风化壳剖面中由上至下变化特征综合决定了稀土矿体主要定位于风化壳全风化层。

关键词 地球化学;临沧花岗岩;离子吸附型稀土矿床;地质特征;成矿过程;云南省澜沧县

中图分类号: P618.7

文献标志码: A

Analysis on geological characteristics and discussion about metallogenic process for ion-adsorption type REE deposit in Lancang County, Yunnan Province

ZHANG Min^{1,2}, TAN Wei², HE XianChuan³, ZHAO FuFeng⁴ and LUO LianYing²

(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)

Abstract

Many ion-adsorption type REE deposits were found in Lancang County, Yunnan Province, which is located in the Middle and South section of Lancang granite. Through analyzing the sample data of granite weathering crust section and typical boreholes in the weathering crust of biotite monzogranite about Late Triassic, this paper researches and analyzes metallogenic geology and geochemistry characteristics of ion-adsorption type REE deposits in weathering crust of granites, discusses the key metallogenic processes, summarizes the relationships between landform with weathering crust and ore outcrop. Researches show that the weathering crust of biotite monzogranite has obvious stratification, the size and morphology of ore body are strictly controlled by development

* 本文得到广东省基础与应用基础研究重大项目(编号: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(编号:2020B1212060055)和中国地质调查局成都地质调查中心“云南省澜沧县富邦稀土矿调查评价”项目(编号:DD20160016-19)联合资助

第一作者简介 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。Email: zhangmin1179@126.com
收稿日期 2021-09-28;改回日期 2022-04-14。赵海杰编辑。

degree of weathering crust and microtopography; REE partition curves are shown as "W" shape smoothly, the differentiation degree of LREE is stronger than HREE, and leaching rate of LREE is slightly higher than HREE except Ce; the ore type is a mixed type which is mainly LREE with MREE and HREE all have. Through deciphering the key metallogenic processes ion-adsorption type REE deposits, it is found that the changes of internal stress, permeability, weathering degree and clay mineral content in weathering crust profile from top to bottom determine that the ore body is mainly located in the full weathering layer of weathering crust.

Key words: geochemistry, Lincang granite, ion-adsorption type REE deposits, geological characteristics, metallogenic process, Lincang County of Yunnan Province

离子吸附型稀土矿是发现于20世纪60年代末中国独特的具有战略意义的优势矿产资源之一,具有元素齐全、开采简单、资源潜力大等特点,成为支撑中国新一代核心材料、能源、武器、信息技术发展的矿产资源之一(王登红等,2013a;2013b;2016;毛景文等,2019a;杨岳清等,2021)。目前,中国离子吸附型稀土矿主要分布在江西、福建、湖南、广东、广西等省市(Wang et al., 1989; 张祖海等, 1990)。对该类型矿床的形成过程、基本特征、成矿机制及开发利用等已有系统的研究(贺伦燕等, 1989; 汤询忠等, 1998; Chi et al., 2007; 李永秀等, 2014; 赵芝等, 2017; 王臻等, 2019),也取得了丰硕的成果。

滇西地区在20世纪80年代发现与临沧花岗岩风化壳有关的磷钇矿、独居石、锆石沉积型稀土砂矿,但由于这些矿床均位于山间构造盆地的富饶农田区,均无法开采。近年来围绕临沧花岗岩风化壳在离子吸附型稀土方面取得了找矿突破,在回龙卡、岔河、勐海等地区发现一批离子吸附型稀土矿床(毛景文等, 2019b; 张保涛等, 2020; 王长兵等, 2021; 蓝信杰等, 2021; 明添学等, 2021)。特别是自2014至今,核工业西藏地质调查院、中国地质调查局、中国科学院广州地球化学研究所相继在临沧花岗岩中南段的澜沧县富邦、上允、富东、东河、南岭、新城等地区开展稀土调查科研项目,集中发现大型离子吸附型稀土矿床2处,中、小型3处,圈定矿产地、找矿靶区5处,提交远景资源量超百万吨。目前,对该区风化壳离子吸附型稀土矿的研究主要集中在矿床成因、控矿因素、成矿规律、成矿预测等方面(赵汀等, 2014; 刀俊山等, 2017; 张民等, 2018),对矿床稀土相态特征,矿石浸出率,地形地貌、风化壳与矿体关系特征等方面研究有所不足。因此,本文通过对该区赋存于花岗岩风化壳的离子吸附型稀土矿床的成矿地质地球化学特征研究,揭示该类矿床的矿化富集规律,以期指导本区离子吸附型稀土资源的进一步找矿工作。

1 区域地质概况

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甸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),总体上沿澜沧江断裂西侧呈反“S”状展布,南北长约350 km,东西宽10~48 km,平均宽22.5 km,分布范围由南至北涉及凤庆县、云县、临沧市临翔区、双江县、澜沧县、勐海县的全部或部分地区,出露面积达7400 km²(图1a),岩性以印支期黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩为主,本次研究范围主要集中在澜沧县内(图1b)。

2 样品采集与分析

2.1 野外样品采集

本文研究区是指北起澜沧县富东乡,南至糯扎渡镇黑河之间约2000 km²的区域(图1b)。本次研究样品取自区内晚三叠世黑云母二长花岗岩风化壳全风化层的剖面及钻孔。风化壳剖面样品取自位于山腰部位的黑云母二长花岗岩风化壳全风化层切开剖面,采样方式为不跨层的连续采样,每件样品重4 kg。风化壳钻孔样品取自位于山腰部位的黑云母二长花岗岩风化壳全风化层的钻孔,样品为组合样,为与全风化层剖面样品区别,该全风化层钻孔样品称为矿石样品,该样品组合过程为:选取穿透全风化层的钻孔,在全风化层段矿层内按每米连续取样,然后再将所取的样品充分混匀重新组成1个组合样,取重量4 kg。所有样品均采用内装塑封袋、外装样品袋的双层包装,确保样品无损和不受污染。

2.2 实验室样品分析

将送测样品风干后,使用对辊机分别将每件样品破碎至~1 mm粒度,再按切乔特缩分公式 $Q=Kd^2$

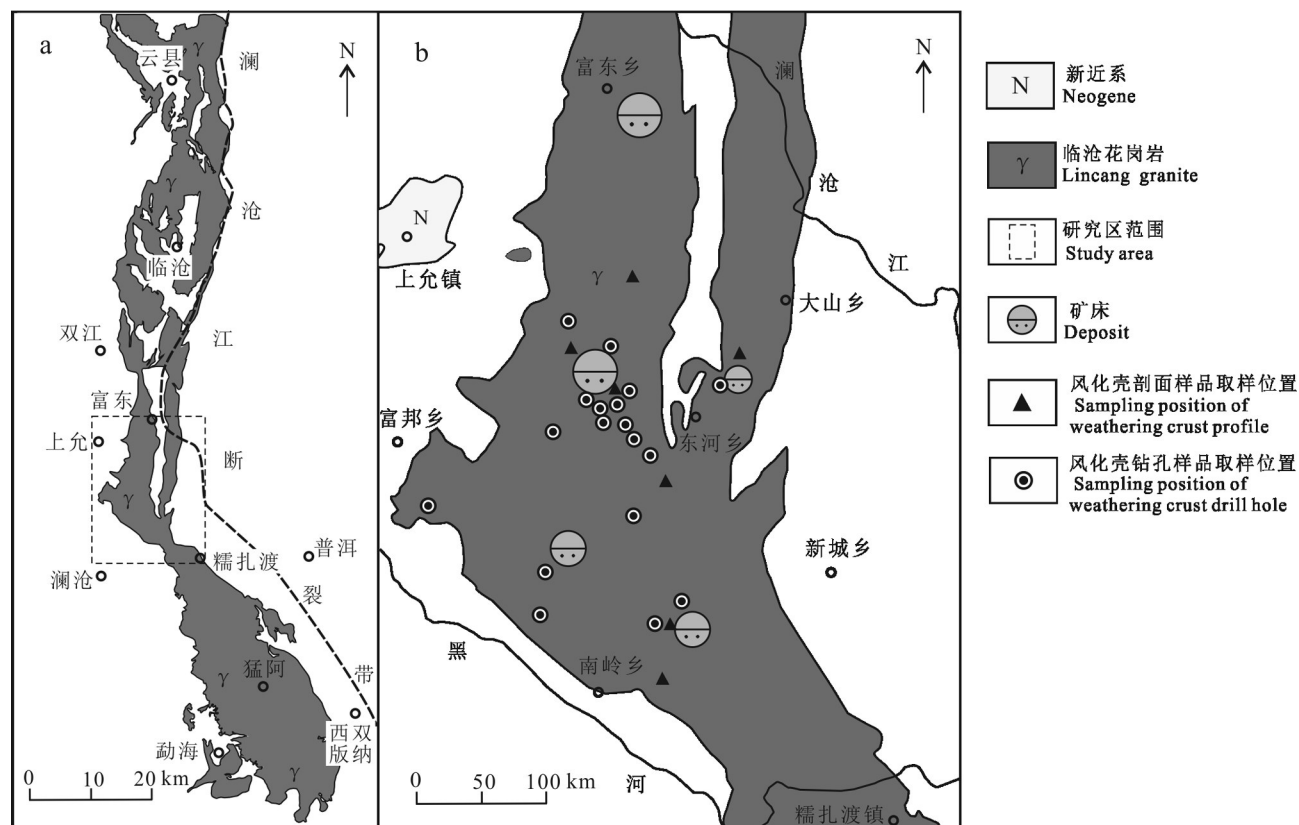


图1 临沧花岗岩带分布示意图(a)及临沧花岗岩带地质和离子吸附型矿床分布简图(b)(底图据方良好等,2013修改)

Fig.1 The distribution map of Lincang granite belt(a) and simplified geological and ion-adsorption type REE deposits map of Lincang granite belt(b)(base map modified after Fang et al., 2017)

($K=0.2$)进行缩分;然后再将缩分后的样品细磨至200目,细磨损耗率低于4%。实验设备及条件为:全相稀土元素分析设备采用Agilent7700x电感耦合等离子体质谱仪(D483),样品重量0.1 g;浸出设备采用HY-2A调速多用振荡器,浸取实验采用柱浸法,注入5%的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浸取液获取浸出相,液固比1:1,浸出时长8 h;分析浸出相稀土氧化物组成;数据分析结果相对误差小于5%。检测环境为温度 1°C ,湿度50%~60%。

3 矿床地质特征

3.1 气候、地形、地貌特征

研究区气候属亚热带山地季风气候,干湿两季明显,雨量集中且充沛;区内地形地貌复杂多样,局部气候差异明显。湿热的气候条件造就了该区强烈的化学风化作用,进而导致在花岗岩中形成了巨厚的风化壳(何耀等,2015)。研究区北部和西部以中

山为主,南部以中山和中山丘陵为主,东部为中山和澜沧江河谷地带;地形整体上呈现出北高南低、西高东低,周边高中部低的特点。第四纪以来,区内构造运动相对稳定,在地势平缓的山顶、山腰和山脊,剥蚀速率低于沉积速率,花岗岩风化壳保存完好,呈现出不同的风化壳地形地貌及产出特征(图2)。

3.2 风化壳原岩特征

中国离子吸附型稀土矿的赋矿岩石原岩主要为加里东期、华力西期、印支期、燕山期的酸性花岗岩(池汝安,1988;曾励训,1989;贺伦燕等,1989;何明珊,1990;李景阳等,1998;李杰纬等,2005;凌洪飞等,2006;华仁民等,2007;杨大欢等,2011;袁忠信等,2012;李学彪等,2012;李永秀等,2014;范飞鹏等,2014)。此外,在混合岩风化壳、峨眉山玄武岩风化壳及碳酸盐岩风化壳也发现稀土元素富集(Nesbitt et al., 1979; Banfield et al., 1989; Braun et al., 1990; Walter et al., 1995;明添学等,2013)。研究区离子吸附型稀土矿的赋矿岩石原岩为临沧花岗岩,主体

风化壳岩体地形、地貌特征					风化壳形态产状特征		
地貌类型	高程变化/m	切深变化/m	山体形态	基岩裸露特征	风化壳类型	平面形态组合	垂直形态 (微地貌单元)
	平均高程/m	平均切深/m					
中山丘陵 (低丘)	900~1200	20~80	宽缓、 独立	无基岩 出露	全覆式		
	约1050	< 50					
中山丘陵 (高丘)	900~1200	30~100	较宽缓、 独立	山脚至谷 底基岩 裸露	裸脚式		
	约1050	约60					
中山 (较高)	1300~2100	700~1000	海拔高, 山 顶宽缓, 高差大	山脚至谷 底基岩 裸露	斑裸式		
	约1950	> 700					
中山 (较低)	1300~2100	500~1000	海拔高, 山 势陡, 脉 支长, 高 差大	山顶、山 脚至谷 底基岩 裸露	残留式		
	约1750	> 500					

	花岗岩基岩 Granite bedrock		花岗岩风化壳 Granite weathering crust		冲积物 Alluvial deposit
--	--------------------------	--	------------------------------------	--	-------------------------

图2 研究区花岗岩风化壳地形、地貌、形态及产状关系图

Fig.2 Relational graph about topography, landform, shape, and occurrence of granite weathering crust in research area

岩石类型包括中细粒-中粗粒黑云母二长花岗岩。其中,中粗粒黑云母二长花岗岩约占研究区花岗岩分布面积的2/3,中细粒黑云母二长花岗岩约占1/3。

岩石呈灰白色,中粗粒结构,块状构造。矿物组成比较单一,主要矿物组合为钾长石(40%)+斜长石(25%)+石英(25%)+黑云母(5%~10%)+其他矿物(0~5%)(图3a~d)。副矿物主要为磷灰石+锆石+钼石+钽石,在黑云母颗粒内或边缘可见不透明矿物呈稀疏分布。钾长石主要为正长石和微斜长石,他形-半自形板状,多无双晶,偶见具格子双晶者,粒度一般1~4 mm,形态多呈略受挤压圆化或椭圆化粒状,颗粒边缘略呈凹凸或参差状,大致均匀分布。斜长石主要为半自形-自形板状,具聚片双晶,粒度及形态与钾长石相似,稀疏分布。石英,无色洁净,干涉色一级暗灰色至一级黄白色,粒度悬殊,0.1~2.2 mm,形态为他形粒状,颗粒多具波状消光,呈受挤压的不规则团状,不均匀充填于长石粒间。黑云母具淡红棕色至棕红色多色性,粒度0.2~1.5 mm,呈挤压变形片状,与石英夹杂稀疏充填于圆化长石粒间。

3.3 花岗岩风化壳分层特征

研究区花岗岩风化壳主要发育在平缓山顶、倾缓山脊及低缓山丘处,在沟谷内分布较薄,甚至尖灭。根据物质组分及风化程度的不同,完整的花岗

岩风化壳由地表至基岩依次可分为腐殖土层、亚黏土层、全风化层、半风化层、弱风化层5个层位(图4张民等,2018)。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。亚黏土层主要为红黏土,含少量的石英颗粒和长石碎屑,可塑性、含水性强,厚度为0.5~3.0 m,几乎不含稀土元素。全风化层为由石英、长石、黑云母和黏土矿物组成的分解破碎粉砂质堆积岩,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。半风化层与全风化层的物质成分基本一致,两者主要区别在于风化程度和稀土元素富集程度的差异,一般规律是:全风化层的稀土元素富集程度高于半风化层;随埋深加大,岩石风化程度减弱至未风化的新鲜基岩即不含离子吸附型稀土矿。

并不是所有风化壳都非常完整,有些风化程度较低的风化壳会缺失全风化层,直接从亚黏土层过渡到半风化层;有些风化壳由于剥蚀程度较高,会缺失亚黏土层或全风化层。从腐殖土层到全风化层,风化程度逐渐减弱,黏土矿物含量逐渐增多,分层内压力逐渐加大;矿物颗粒间越发紧密,水溶液越往下渗透性逐渐变差。从全风化层到弱风化层,风化程度陡然减弱,黏土矿物含量急剧减少,分层内压力快速加大,水溶液也很难再往下渗透。

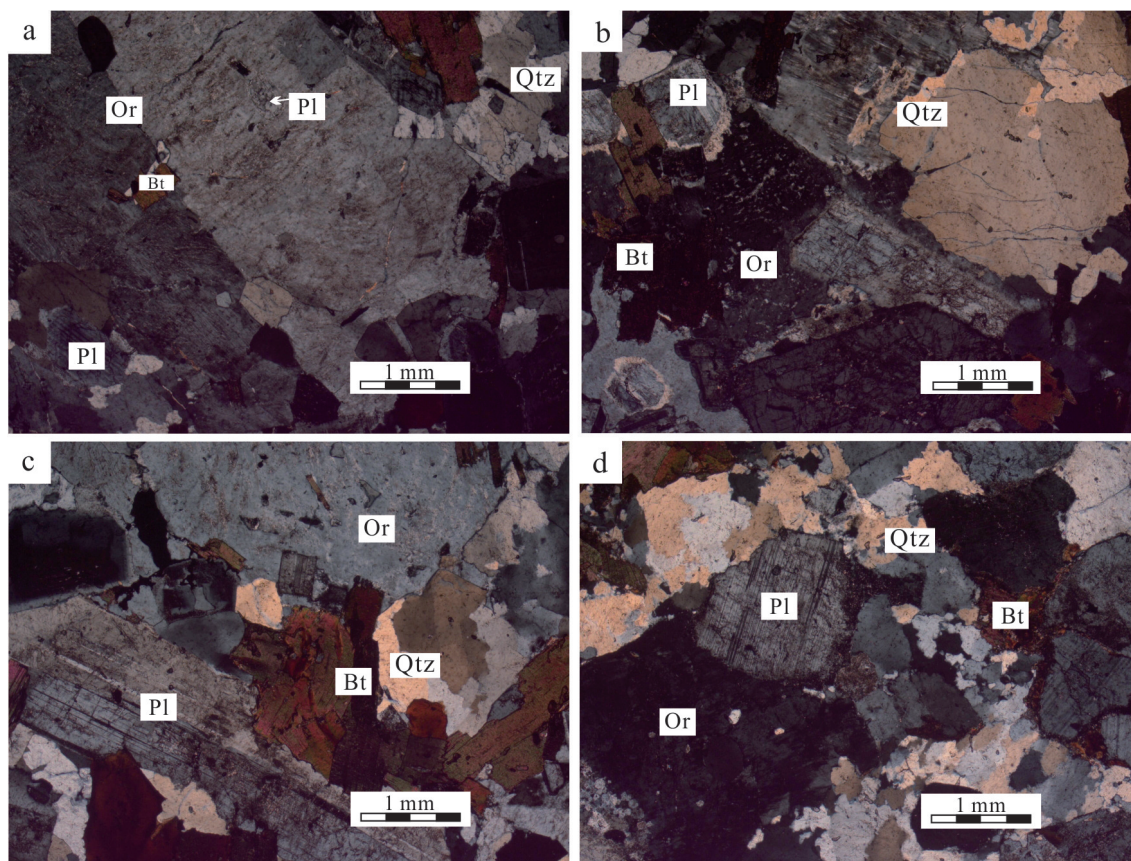


图3 黑云母二长花岗岩显微特征

a. 自形板状斜长石(+); b. 不规则团状石英呈充填于长石粒间(+); c. 黑云母呈挤压变形片状(+); d. 钾长石边缘参差不齐(+)
Qtz—石英; Bt—黑云母; Pl—斜长石; Or—钾长石

Fig. 3 Microscopic characteristics of porphyritic biotite monzogranite

a. Tabular plagioclase(+); b. Quartz is filled in feldspar with irregular crumb structure(+); c. Biotite is schistose by pressed;
d. Orthoclase has jagged edges(+)

Qtz—Quartz; Bt—Biotite; Pl—Plagioclase; Or—Orthoclase

3.4 矿体特征

矿体主要赋存在花岗岩风化壳全风化层中,矿体规模及形态严格受风化壳发育程度及微地貌形态控制(图5),具有顺区域构造线及分水岭随山势水平展布的特点;总体产状呈层状和似层状。矿石品位在全风化层中部及下部最高,属风化壳全风化层中部及下部富集型。矿体在倾缓山脊或平缓山脊因风化壳保存程度最好,埋藏最深,平均达到10~15 m,最深超过30 m,呈隐伏式或半隐伏式;矿体品位较高,厚度最大,厚度达到5~15 m,最厚超过20 m,矿体厚度变化系数和品位变化系数均较小。在山脊两侧或山顶四周,剥蚀作用逐渐变强,风化壳保存完好程度逐渐降低,矿体埋深变浅,呈裸露式或残留式,部分地段矿体已遭受淋滤剥蚀,因此矿体厚度及品位随

之降低,厚度一般在1~10 m,特别是残留式矿体,连续性差,厚度及品位变化系数较大。

矿体厚度在横纵方向有所差异,在顺主山脊走向上矿体厚度延伸总体比横剖面上稳定,品位也相对稳定,但仍具有随坡度变陡,矿体埋深变浅、厚度变小、品位逐渐降低的特点;垂直山脊方向呈波状起伏变化,在低缓山丘的山腰及山顶处厚度最大,向两侧山沟处矿体减薄,切割较深区域的矿体被第四系冲沟切断,而沿矿体总体延长方向主山脊厚度稳定(图6a、b)。

4 矿床地球化学特征

4.1 花岗岩风化壳全风化层元素地球化学特征

样品取自黑云母二长花岗岩风化壳全风化层,

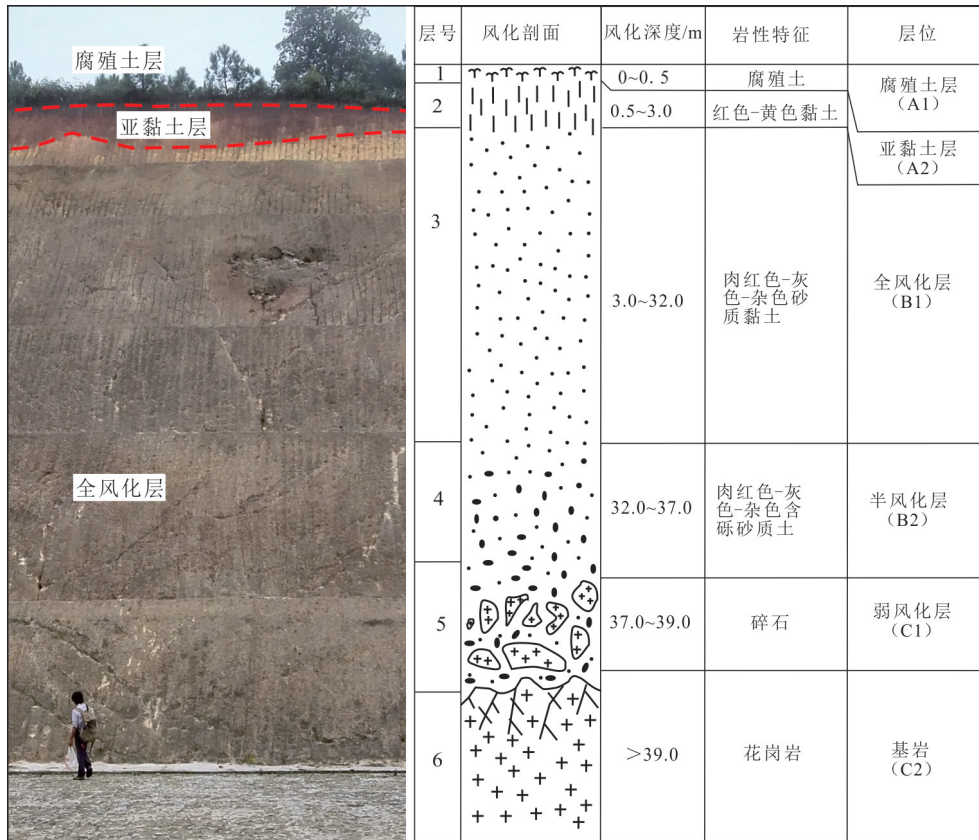


图4 离子吸附型稀土矿床中花岗岩风化壳分层特征示意图(底图据张民等, 2018)

Fig.4 Stratified feature of granite weathering crust in ion-adsorption type REE deposits (base map after Zhang et al., 2018)

风化壳形态产状		矿体形态、产状特征					
产状	厚度/m	矿体类型	平面组合形态	垂直形态 (微地貌单元)	产状	矿体一般厚度/m	盖层特征
5°~15°	最厚超过60	隐伏式	同风化壳展布形态基本保持一致		层状、似层状	5~15	广泛分布, 普遍厚度达5~10 m
10°~20°	最厚约40	半隐伏式	同风化壳展布形态基本保持一致		层状、似层状	5~10	不普遍, 厚度不大
5°~30°	最厚约20	裸露式	同风化壳展布形态基本保持一致		层状、似层状	3~7	很少有盖层, 有亦不厚
10°~40°	最厚约10	残留式	同风化壳展布形态基本保持一致		层状、似层状	1~10	无盖层

花岗岩风化壳 Granite weathering crust 矿体 Ore-body

图5 离子吸附型稀土矿体形态、产状特征示意图

Fig.5 The sketch map to show the stratified feature about morphology and attitude of the ion-adsorption type REE ore body

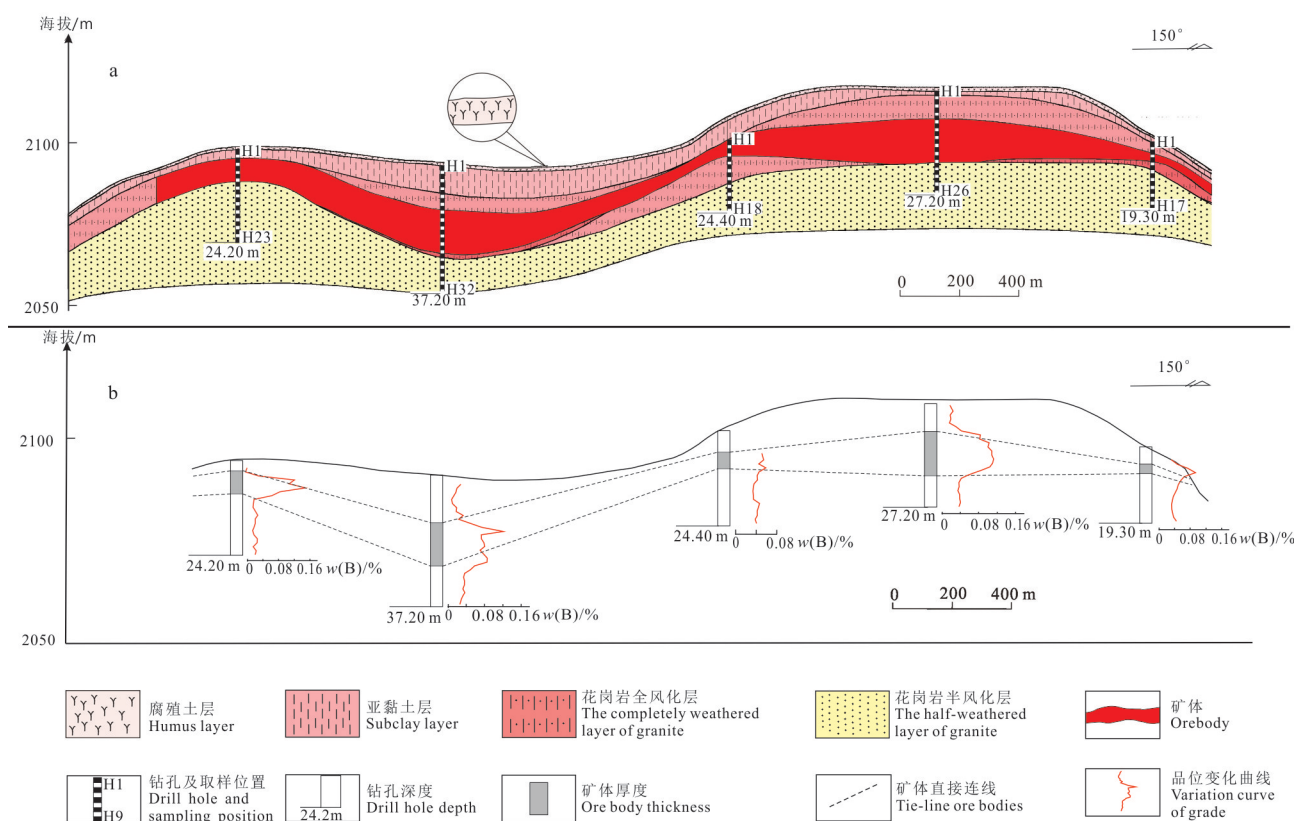


图 6 风化壳全风化层中矿体特征剖面示意图(a)及矿体厚度、品位变化示意图(b)

Fig.6 The diagrammatic cross-section of orebody characteristics about the full weathering layer of weathering crust (a) and the diagrammatic of ore body thickness with grade change(b)

中粗粒松散砂质结构,土状构造,颜色为灰褐色、杂色。分析结果表明,全风化层的稀土元素发生了富集,具备形成离子吸附型稀土矿的条件,其地球化学特征主要表现为以下几个方面:

(1) 主量元素特征

研究区离子吸附型稀土矿床中黑云母二长花岗岩风化壳全风化层主量元素及相关参数见表 1,可以看出: $w(\text{SiO}_2)$ 为 65.62%~73.01%,平均值为 69.41%;风化作用对 $w(\text{SiO}_2)$ 影响较小,但风化作用的强弱决定了石英颗粒的大小、磨圆度,这些都会影响风化壳的渗透性,影响携带稀土离子的酸性溶液运移的方向和速度。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 14.01%~17.28%,平均值为 15.60%; Al_2O_3 被风化后会提供呈游离态的 Al^{3+} ,这些铝离子具有和稀土离子一样的吸附特性,成为离子吸附型稀土矿中主要的杂质离子。 $w(\text{MgO})$ 为 0.24%~1.68%,平均值为 0.85%; $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 为 1.35%~4.74%,平均为 2.80%; $w(\text{FeO})$ 为 0.43%~0.96%,平均为 0.67%; $w(\text{CaO})$ 为 0.05%~

0.52%,平均为 0.12%; $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 0.10%~1.68%,平均为 0.36%,与临沧花岗岩全岩主量元素平均数据中对应元素的值相比,除了 $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 增加,其他都有所下降,这表明风化作用使部分 Fe^{2+} 离子被氧化成 Fe^{3+} 离子,同时呈游离态 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子被黏土矿物吸附形成胶态沉积物,或者被水冲刷流失,导致风化壳中 $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{FeO})$ 、 $w(\text{CaO})$ 降低; Na^+ 离子易溶于水,流失更为严重。

(2) 稀土元素特征

研究区离子吸附型稀土矿床中黑云母二长花岗岩风化壳全风化层稀土元素组成和相关参数见表 2,可以看出: ΣLREE 为 166.80×10^{-6} ~ 903.12×10^{-6} ,平均为 417.57×10^{-6} ; ΣHREE 为 56.94×10^{-6} ~ 914.10×10^{-6} ,平均为 248.22×10^{-6} ; LREE/HREE 为 0.99~4.11,平均为 2.48,轻、重稀土元素分异强烈,其配分曲线(图 7a)呈右倾平滑的浅“W”型;HREE 部分分布较为平坦, $w(\text{Y})$ 约是 $w(\text{Yb})$ 的 10 倍。 δEu 为 0.21~0.53,平均值为 0.36,呈负 δEu 异常; δCe 为 0.21~0.92,平均

表1 研究区黑云母二长花岗岩风化壳全风化层主量元素及相关参数表

Table1 The major elements and related parameters about the full weathering layer of weathering crust of biotite monzogranite in research area

组分	w(B)/%							
	B3607	B3715	B41114	B11305	B41311	B31812	B32013	①
SiO ₂	72.34	69.91	69.14	67.27	68.59	65.62	73.01	68.37
Al ₂ O ₃	15.44	14.01	14.08	17.28	16.55	16.54	15.28	14.28
Fe ₂ O ₃	1.74	3.29	2.19	3.55	2.75	4.74	1.35	1.36
FeO	0.79	0.63	0.43	0.96	0.52	0.62	0.71	2.85
CaO	0.06	0.52	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	2.13
MgO	0.28	1.04	1.68	0.69	0.53	1.50	0.24	2.02
K ₂ O	4.13	4.22	4.10	2.56	4.12	2.43	4.70	3.71
Na ₂ O	0.19	1.68	0.14	0.10	0.11	0.10	0.23	2.16
TiO ₂	0.19	0.49	0.29	0.47	0.45	0.78	0.14	0.64
P ₂ O ₅	0.03	0.06	0.02	0.03	0.03	0.06	0.01	0.16
MnO	0.04	0.04	0.05	0.12	0.02	0.06	0.03	0.06
总和	99.76	99.64	99.60	99.55	99.65	99.60	99.84	97.74
H ₂ O ⁺	4.48	3.71	7.36	6.40	5.88	7.02	4.03	
CO ₂	0.05	0.04	0.06	0.06	0.05	0.08	0.05	
Mg [#]	0.20	0.50	0.54	0.32	0.28	0.66	0.22	0.62

注:本文数据由西南冶金测试中心分析测试;①为临沧花岗岩全岩主量元素平均数据(据孔会磊等,2012);TFeO=0.8998×TFe₂O₃,Mg[#]=100×Mg²⁺/(Mg²⁺+TFe²⁺)。

表2 研究区黑云母二长花岗岩风化壳全风化层稀土元素及相关参数表

Table 2 The REE concentrations and related parameters about the full weathering layer of weathering crust of biotite monzogranite in research area

组分	w(B)/10 ⁻⁶							
	B3607	B3715	B41114	B11305	B41311	B31812	B32013	①
La	234.00	59.70	110.00	371.00	79.40	82.50	53.20	54.73
Ce	96.50	107.00	158.00	193.00	117.00	123.00	45.20	100.90
Pr	48.60	11.70	23.10	59.20	15.00	18.90	11.60	11.54
Nd	192.00	45.90	90.00	220.00	56.90	79.50	44.60	42.43
Sm	41.20	8.29	19.20	53.90	9.65	16.00	11.40	8.29
Eu	2.94	1.33	1.74	6.02	1.33	2.67	0.80	1.53
Gd	25.70	7.23	16.40	60.10	9.13	14.20	12.00	7.38
Tb	3.97	1.14	3.04	13.50	1.52	2.69	2.83	1.16
Dy	19.80	6.24	18.30	88.70	8.87	16.90	18.80	6.95
Ho	3.36	1.13	3.33	16.50	1.58	3.26	3.52	1.37
Er	10.20	3.14	9.78	47.80	4.60	9.92	10.80	3.91
Tm	1.46	0.44	1.39	6.90	0.64	1.52	1.73	0.60
Yb	10.00	2.90	8.94	41.70	4.09	9.96	11.70	3.66
Lu	1.44	0.42	1.28	5.90	0.60	1.41	1.75	0.52
Y	95.20	34.30	104.00	633.00	51.90	103.00	120.00	38.45
LREE	615.24	233.92	402.04	903.12	279.28	322.57	166.80	219.43
HREE	171.13	56.94	166.46	914.10	82.93	162.86	183.13	64.00
TREE	786.37	290.86	568.50	1817.22	362.21	485.43	349.93	283.40
LRHE/HREE	3.60	4.11	2.42	0.99	3.37	1.98	0.91	3.54
La/Ce	2.42	0.56	0.70	1.92	0.68	0.67	1.18	0.54
δEu	0.26	0.51	0.29	0.32	0.42	0.53	0.21	0.59
δCe	0.21	0.92	0.72	0.29	0.77	0.72	0.42	1.76
(La/Yb) _N	16.20	14.25	8.52	6.16	13.44	5.74	3.15	10.47
(La/Sm) _N	3.56	4.51	3.59	4.31	5.16	3.23	2.92	4.06
(Gd/Yb) _N	2.12	2.06	1.52	1.19	1.85	1.18	0.85	1.67

注:比值单位为1;本文数据由西南冶金测试中心分析测试;①为临沧花岗岩全岩稀土元素平均数据(据孔会磊等,2012)。

值为 0.58, 呈负 δCe 异常。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 3.15~16.20, 平均值为 9.64; $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 2.92~5.16, 平均值为 3.91; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 为 0.85~2.12, 平均值为 1.54。表明风化壳中轻、重稀土元素都发生了较强的分异, 且重稀土元素分异程度相对较弱。

以上风化壳稀土元素的特征指示:

a. 风化壳稀土元素与临沧花岗岩全岩稀土元素总量相比有了增加, 说明风化过程中稀土元素发生了富集。

b. 据表 3 可见, 轻稀土元素的平均占比为 73.33%, 说明风化壳的稀土类型为以轻稀土元素为主, 轻稀土元素中又以 La 和 Ce 这 2 种元素为主。

c. 稀土元素配分曲线呈“W”形, 整体仍然表现出轻稀土元素富集, 与临沧花岗岩轻稀土元素富集的配分模式相似, 没有从根本上改变稀土元素的配分模式。

d. 母岩中 $w(\text{Eu})$ 平均值为 1.53% (表 2), 而风化

壳中 $w(\text{Eu})$ 平均值为 1.96%, 说明风化作用使得 Eu 元素呈略富集。

(3) 微量元素特征

研究区离子吸附型稀土矿床中黑云母二长花岗岩风化壳全风化层微量元素组成和相关参数见表 3。从原始地幔标准化微量元素蛛网图 (图 7b) 上可以看出: 富集大离子亲石元素 Th 和 Rb, 特别是 Th 元素可达到原始地幔丰度的 300~400 倍; 明显亏损高场强元素 Nb 和 Sr。大部分微量元素受风化淋滤影响较小, 基本上与临沧花岗岩富集、亏损形式一致。

4.2 矿石和矿石浸出相全相稀土氧化物组成特征

矿石全相稀土氧化物组成及相关参数见表 4, 可以看出: ΣLREE 为 $402.09 \times 10^{-6} \sim 1119.60 \times 10^{-6}$, 平均 587.92×10^{-6} ; ΣHREE 为 $124.68 \times 10^{-6} \sim 410.84 \times 10^{-6}$, 平均为 268.29×10^{-6} ; LREE/HREE 为 1.31~3.61, 平均为 2.29。稀土氧化物配分曲线 (图 8a) 呈右倾平滑的

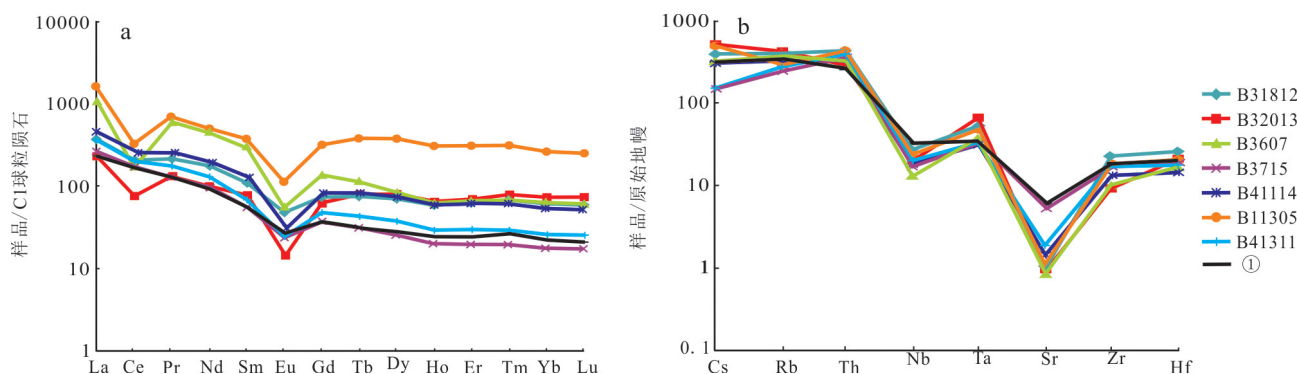


图 7 黑云母二长花岗岩风化壳全风化层稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig.7 The REE distribution patterns(a) and trace element spidergrams (b) about the full weathering layer of weathering crust of biotite monzogranite

表 3 研究区黑云母二长花岗岩风化壳全风化层微量元素参数表

Table 3 The trace elements about the full weathering layer of weathering crust of biotite monzogranite in research area

组分	$w(\text{B})/10^{-6}$							
	B3607	B3715	B41114	B11305	B41311	B31812	B32013	①
Cs	10.10	4.82	9.42	16.30	4.83	12.40	16.60	9.68
Rb	237.00	160.00	198.00	195.00	175.00	246.00	265.00	191.17
Th	26.90	30.10	26.80	37.20	32.90	35.80	24.80	23.60
Nb	9.35	12.20	12.60	17.40	14.30	18.90	14.20	34.23
Ta	1.49	1.36	1.24	2.01	1.36	2.06	2.68	1.49
Sr	17.80	114.00	30.00	23.60	39.80	21.00	20.80	169.48
Zr	112.00	194.00	143.00	206.00	189.00	253.00	104.00	211.50
Hf	5.06	5.86	4.38	6.45	5.40	7.75	6.52	6.16

注: 本文数据由西南冶金测试中心分析测试; ①为临沧花岗岩全岩微量元素平均数据 (据孔会磊等, 2012)。

表4 矿石全相稀土氧化物组成及相关参数一览表
Table 4 The rare earth oxide composition and related parameters of ore all-phase

样品 编号	$w(B)/10^{-6}$														ΣREE			
	QLa ₂ O ₃	QCeO ₂	QPr ₆ O ₁₁	QNd ₂ O ₃	QSm ₂ O ₃	QEu ₂ O ₃	QGd ₂ O ₃	QTb ₂ O ₇	QDy ₂ O ₃	QHo ₂ O ₃	QEr ₂ O ₃	QTm ₂ O ₃	QYb ₂ O ₃	QLu ₂ O ₃		QY ₂ O ₃		
ZK09-ZH	342.45	398.00	72.25	248.45	50.21	8.24	45.18	8.20	39.94	8.56	23.78	3.63	19.59	2.89	259.07	1119.60	410.84	1530.45
ZK16-ZH	258.01	162.15	58.60	219.29	48.01	7.73	39.88	7.28	34.89	7.45	20.81	3.18	17.54	2.59	213.35	753.79	346.97	1100.75
ZK13-ZH	182.95	257.97	38.18	139.97	29.45	5.79	28.58	5.99	31.91	7.24	20.58	3.46	19.02	2.87	228.59	654.31	348.24	1002.54
ZK10-ZH	121.97	174.43	26.10	91.45	22.26	2.22	21.32	4.74	26.40	6.07	17.38	2.74	14.80	2.21	182.87	438.43	278.53	716.97
ZK07-ZH	161.84	184.26	33.95	118.98	23.89	3.71	22.13	4.16	20.54	4.49	12.46	1.87	10.20	1.48	125.98	526.63	203.31	929.95
ZK04-ZH	205.24	167.06	43.13	141.14	31.89	3.59	31.12	6.54	36.73	7.73	21.50	3.14	18.56	2.67	257.80	592.05	385.79	977.84
ZK41-ZH	267.40	199.00	66.69	230.95	51.02	6.39	41.84	7.36	37.76	7.46	20.24	2.92	17.54	2.49	226.05	821.45	363.66	1185.11
ZK42-ZH	255.67	183.03	58.48	197.13	41.63	6.26	34.81	6.26	33.51	6.85	18.41	2.62	16.06	2.19	203.19	742.20	323.9	1066.09
ZK36-ZH	224.00	276.39	52.07	177.30	37.11	6.43	31.93	5.61	29.38	5.96	16.12	2.33	14.12	1.93	184.14	773.30	291.52	1064.82
ZK27-ZH	138.39	122.10	31.65	106.61	24.70	2.78	19.71	3.52	18.71	3.83	10.74	1.72	11.21	1.63	116.33	426.23	187.4	613.62
ZK33-ZH	139.56	141.27	32.86	109.41	24.35	3.08	21.78	4.18	22.49	4.62	12.69	1.96	12.30	1.64	143.50	450.53	225.16	675.70
ZK19-ZH	121.97	147.41	25.86	87.25	19.60	2.13	18.67	3.53	19.86	4.08	11.25	1.67	10.44	1.41	121.66	404.22	192.57	596.78
ZK25-ZH	172.40	112.28	40.11	131.81	34.21	3.17	32.62	6.61	37.07	7.90	21.95	3.38	21.64	3.05	243.83	493.98	378.05	872.02
ZK59-ZH	200.55	167.06	43.13	143.47	31.31	3.62	27.32	4.99	25.36	4.97	13.38	1.90	11.84	1.64	156.20	589.14	247.6	836.74
ZK61-ZH	124.32	184.26	27.30	93.31	18.44	2.41	15.33	2.53	12.51	2.53	6.93	0.99	6.70	0.96	76.20	450.04	124.68	574.71
ZK53-ZH	166.54	167.06	36.00	121.31	25.28	3.76	20.98	3.67	18.82	3.80	10.20	1.53	9.20	1.27	116.58	519.95	186.05	706.01
ZK69-ZH	119.62	169.52	26.46	88.77	17.86	2.47	14.87	2.48	13.20	2.77	7.82	1.15	7.41	1.03	84.83	424.70	135.56	560.27
ZK67-ZH	115.52	152.32	25.98	86.08	20.06	2.13	18.21	3.46	19.17	4.02	11.43	1.82	11.35	1.61	128.26	402.09	199.33	601.43

注:数据由国土资源部南昌矿产资源监督检测中心分析测试。

浅“W”型,与黑云母二长花岗岩风化壳全风化层剖面样品的稀土元素配分曲线(图7a)基本一致,表明钻孔矿石组合样品的稀土氧化物分析可以替代并较之风化壳全风化层剖面样品的稀土元素分析更具有代表性,也为进一步对比分析矿石浸出相全相稀土氧化物组成特征准备了数据基础。

矿石浸出相稀土氧化物组成及相关参数见表5,可以看出: \sum LREE为 $131.95 \times 10^{-6} \sim 502.47 \times 10^{-6}$,平均为 99.99×10^{-6} ; \sum HREE为 $74.67 \times 10^{-6} \sim 285.36 \times 10^{-6}$,平均为 179.98×10^{-6} ,LREE/HREE为1.21~2.00,平均为1.68。Ce元素继续呈现出强烈负异常,稀土元素配分曲线(图8b)呈右倾平滑的深“W”型,重稀土元素部分分布较为平坦。 $w(\text{SY}_2\text{O}_3)$ 是 $w(\text{SYb}_2\text{O}_3)$ 的13~17倍, $w(\text{SLa}_2\text{O}_3)$ 是 $w(\text{SSm}_2\text{O}_3)$ 的5.0~6.5倍, $w(\text{SGd}_2\text{O}_3)$ 是 $w(\text{SYb}_2\text{O}_3)$ 的2~3倍, $(\text{SLa}/\text{SYb})_{\text{N}}$ 平均为10.68, $(\text{SLa}/\text{SSm})_{\text{N}}$ 平均为3.56, $(\text{SGd}/\text{SYb})_{\text{N}}$ 平均为2.00。这说明,盐类溶液的浸出作用使轻重稀土元素发生进一步分异,轻稀土元素的分异程度仍然强于重稀土元素。

4.3 矿石稀土氧化物浸出特征

研究区离子吸附型稀土矿床矿石稀土氧化物浸出率相关参数见表6,可以看出各样品的总浸出率在31.62%~79.77%之间,平均总浸出率为54.46%。其中,轻稀土元素浸出率为31.76%~75.68%,平均为50.20%,重稀土元素浸出率为41.64%~89.50%,平均为66.11%,但是,这并不能表明在相同的浸出条件下,重稀土元素浸出率明显高于轻稀土氧化物,由于“Ce亏效应”,含矿层Ce元素较少,Ce元素浸出率较

低,拉低了轻稀土浸出率的整体水平,除Ce元素外,轻稀土元素浸出率是略高于重稀土的,由图9可以看出,除了Ce元素出现波谷,整个曲线呈现出平滑右倾的形态;轻稀土氧化物中的SNd/QNd、SSm/QSm、SEu/QEu浸出率较高;重稀土氧化物中的SGd/QGd、STb/QTb、SY/QY浸出率较高。

矿石全相稀土氧化物中,轻稀土元素占稀土元素总量的52.36%~74.68%,中稀土元素占稀土元素总量8.49%~13.94%,重稀土元素占稀土元素总量15.97%~33.70%。轻稀土元素中,La和Ce元素所占比重最大,中稀土元素中,Sm、Gd和Dy所占比重较大,重稀土元素中,Y所占比重最大。

矿石浸出相稀土氧化物中,轻稀土元素占稀土元素总量的49.75%~64.88%,中稀土元素占稀土元素总量13.56%~16.18%,重稀土元素占稀土元素总量21.55%~38.59%。轻稀土元素中,La和Ce所占比重最大,中稀土元素中,Sm、Gd和Dy占比重较大,重稀土元素中,Y所占比重最大。因此,矿石类型是以轻稀土元素为主、中重稀土元素配分齐全的混合型稀土矿。

5 讨论

5.1 成矿过程

离子吸附型稀土矿的成矿过程主要表现为风化壳原岩—花岗岩在遭受风化分解过程中,由引发风化分解的化学溶液携带的异地或原地解离的稀土离子或稀土氧化物矿质运移至风化壳全风化层破碎岩

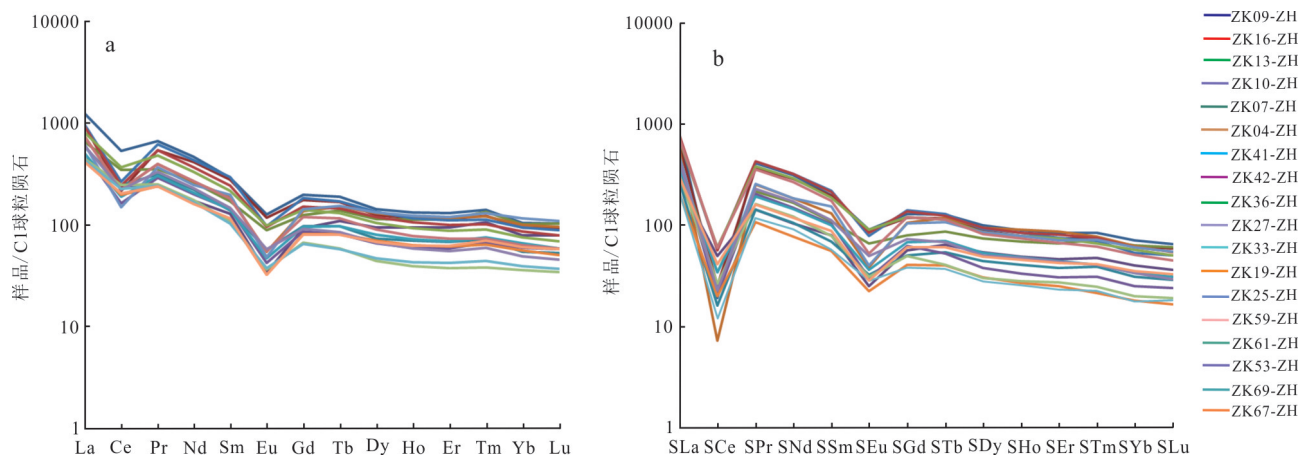


图8 矿石全相稀土氧化物(a)和矿石浸出相稀土氧化物(b)配分曲线

Fig.8 Ore REES' distribution patterns of all-phase (a) and leaching-phase (b)

表5 矿石浸出相稀土氧化物组成及相关参数一览表
Table 5 The rare earth oxide composition and related parameters of ore leaching-phase

样品 编号	$w(B)/10^{-6}$														ΣREE			
	SLa ₂ O ₃	SCeO ₂	SPr ₆ O ₁₁	SNd ₂ O ₃	SSm ₂ O ₃	SEu ₂ O ₃	SGd ₂ O ₃	STb ₄ O ₇	SDy ₂ O ₃	SHo ₂ O ₃	SEr ₂ O ₃	STm ₂ O ₃	SYb ₂ O ₃	SLu ₂ O ₃		SY ₂ O ₃		
ZK09-ZH	204.06	14.00	43.98	163.30	33.63	5.79	29.16	5.42	27.54	5.66	15.09	2.15	12.98	1.80	175.25	464.76	275.05	739.82
ZK16-ZH	163.02	18.79	39.02	149.30	32.93	5.56	26.51	4.92	24.45	4.97	13.26	1.90	11.28	1.61	152.39	408.62	241.29	649.92
ZK13-ZH	105.32	25.31	23.20	87.13	18.44	4.26	17.86	3.69	20.43	4.34	11.89	1.84	11.62	1.66	147.31	263.66	220.64	484.30
ZK10-ZH	68.61	36.48	15.22	54.82	13.45	1.61	12.68	2.72	14.92	3.12	8.30	1.21	7.33	0.99	97.02	190.19	148.29	338.49
ZK07-ZH	70.60	11.88	15.22	55.76	11.71	2.08	11.27	2.31	12.28	2.57	6.79	0.99	5.74	0.80	84.07	167.25	126.82	294.07
ZK04-ZH	143.08	5.37	27.06	97.05	22.15	2.48	23.74	5.02	26.05	5.75	15.55	1.96	11.50	1.49	194.30	297.19	285.36	582.56
ZK41-ZH	192.34	42.38	44.94	169.13	37.11	5.01	31.47	5.47	25.48	5.33	13.49	1.77	9.85	1.38	157.47	490.91	251.71	742.62
ZK42-ZH	206.41	41.27	45.43	167.97	35.95	5.44	30.54	5.22	25.94	5.35	14.52	1.90	11.11	1.50	154.93	502.47	251.01	753.49
ZK36-ZH	182.95	44.71	40.60	151.64	31.54	5.84	27.20	4.82	23.76	4.94	13.26	1.69	10.56	1.39	143.50	457.28	231.12	688.39
ZK27-ZH	102.62	14.99	21.75	77.92	17.28	1.95	13.95	2.23	10.46	2.10	5.52	0.79	4.62	0.66	62.35	236.51	102.68	339.17
ZK33-ZH	96.40	25.06	20.66	75.82	16.81	2.33	15.33	2.96	14.69	3.05	7.95	1.03	6.23	0.85	91.44	237.08	143.53	380.60
ZK19-ZH	54.65	14.62	11.44	40.36	9.44	1.44	9.14	1.69	8.52	1.70	4.51	0.55	3.33	0.45	50.29	131.95	80.18	212.11
ZK25-ZH	127.83	16.95	27.43	96.00	26.09	2.59	23.28	4.52	23.53	4.96	12.81	1.83	11.10	1.50	144.77	296.89	228.3	525.19
ZK59-ZH	191.16	43.73	38.18	139.97	29.45	3.39	26.85	4.79	22.61	4.67	12.12	1.56	9.34	1.24	138.42	445.88	221.6	667.50
ZK61-ZH	81.39	19.41	17.40	64.27	13.22	1.99	11.11	1.72	8.34	1.76	4.89	0.63	3.64	0.52	50.92	197.68	83.53	281.23
ZK53-ZH	114.46	16.71	24.41	89.58	19.02	3.22	16.37	2.89	13.89	3.00	7.90	1.04	6.17	0.81	88.90	267.4	140.97	408.36
ZK69-ZH	57.35	8.86	12.57	47.36	9.82	1.83	8.53	1.56	7.74	1.62	4.16	0.57	3.26	0.50	46.73	137.79	74.67	212.45
ZK67-ZH	80.69	30.22	17.04	61.70	14.84	1.84	13.60	2.58	13.54	2.89	7.65	1.05	6.43	0.90	84.32	206.33	132.96	339.29

注:数据由国土资源部南昌矿产资源监督检测中心分析测试。

表 6 矿石稀土氧化物浸出率一览表
Table 6 The leaching rates of ore rare earth oxides

样品 编号	$w(B)/10^{-2}$																	
	La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Tb ₄ O ₇	Dy ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Tm ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	ΣLREE	ΣHREE	ΣREE
ZK09-ZH	59.59	3.52	60.87	65.73	66.98	70.27	64.54	66.10	68.95	66.12	63.46	59.23	66.26	62.28	67.65	41.51	66.95	48.34
ZK16-ZH	63.18	11.59	66.59	68.08	68.59	71.93	66.47	67.58	70.08	66.71	63.72	59.75	64.31	62.16	71.43	54.21	69.54	59.04
ZK13-ZH	57.57	9.81	60.76	62.25	62.61	73.58	62.49	61.60	64.02	59.94	57.77	53.18	61.09	57.84	64.44	40.30	63.36	48.31
ZK10-ZH	56.25	20.91	58.31	59.95	60.42	72.52	59.47	57.38	56.52	51.40	47.76	44.16	49.53	44.80	53.05	43.38	53.24	47.21
ZK07-ZH	43.62	6.45	44.83	46.87	49.02	56.06	50.93	55.53	59.79	57.24	54.49	52.94	56.27	54.05	66.73	31.76	62.38	31.62
ZK04-ZH	69.71	3.21	62.74	68.76	69.46	69.08	76.29	76.76	70.92	74.39	72.33	62.42	61.96	55.81	75.37	50.20	73.97	59.58
ZK41-ZH	71.93	21.30	67.39	73.23	72.74	78.40	75.22	74.32	67.48	71.45	66.65	60.62	56.16	55.42	69.66	59.76	69.22	62.66
ZK42-ZH	80.73	22.55	77.68	85.21	86.36	86.90	87.73	83.39	77.41	78.10	78.87	72.52	69.18	68.49	76.25	67.70	77.50	70.68
ZK36-ZH	81.67	16.18	77.97	85.53	84.99	90.82	85.19	85.92	80.87	82.89	82.26	72.53	74.79	72.02	77.93	59.13	79.28	64.65
ZK27-ZH	74.15	12.28	68.72	73.09	69.96	70.14	70.78	63.35	55.91	54.83	51.40	45.93	41.21	40.49	53.60	55.49	54.79	55.27
ZK33-ZH	69.07	17.74	62.87	69.30	69.03	75.65	70.39	70.81	65.32	66.02	62.65	52.55	50.65	51.83	63.72	52.62	63.75	56.33
ZK19-ZH	44.81	9.92	44.24	46.26	48.16	67.61	48.96	47.88	42.90	41.67	40.09	32.93	31.90	31.91	41.34	32.64	41.64	35.54
ZK25-ZH	74.15	15.10	68.39	72.83	76.26	81.70	71.37	68.38	63.47	62.78	58.36	54.14	51.29	49.18	59.37	60.10	60.39	60.23
ZK59-ZH	95.32	26.18	88.52	97.56	94.06	93.65	98.28	95.99	89.16	93.96	90.58	82.11	78.89	75.61	88.62	75.68	89.50	79.77
ZK61-ZH	65.47	10.53	63.74	68.88	71.69	82.57	72.47	67.98	66.67	69.57	70.56	63.64	54.33	54.17	66.82	43.92	67.00	48.93
ZK53-ZH	68.73	10.00	67.81	73.84	75.24	85.64	78.03	78.75	73.80	78.95	77.45	67.97	67.07	63.78	76.26	51.43	75.77	57.84
ZK69-ZH	47.94	5.23	47.51	53.35	54.98	74.09	57.36	62.90	58.64	58.48	53.20	49.57	43.99	48.54	55.09	32.44	55.08	37.92
ZK67-ZH	69.85	19.84	65.59	71.68	73.98	86.38	74.68	74.57	70.63	71.89	66.93	57.69	56.65	55.90	65.74	51.31	66.70	56.41

注:总浸出率等于矿石浸出相稀土氧化物总量与矿石全相稀土氧化物总量之比的百分数;各浸出率等于矿石浸出相稀土氧化物各分量与矿石全相稀土氧化物各分量之比的百分数。

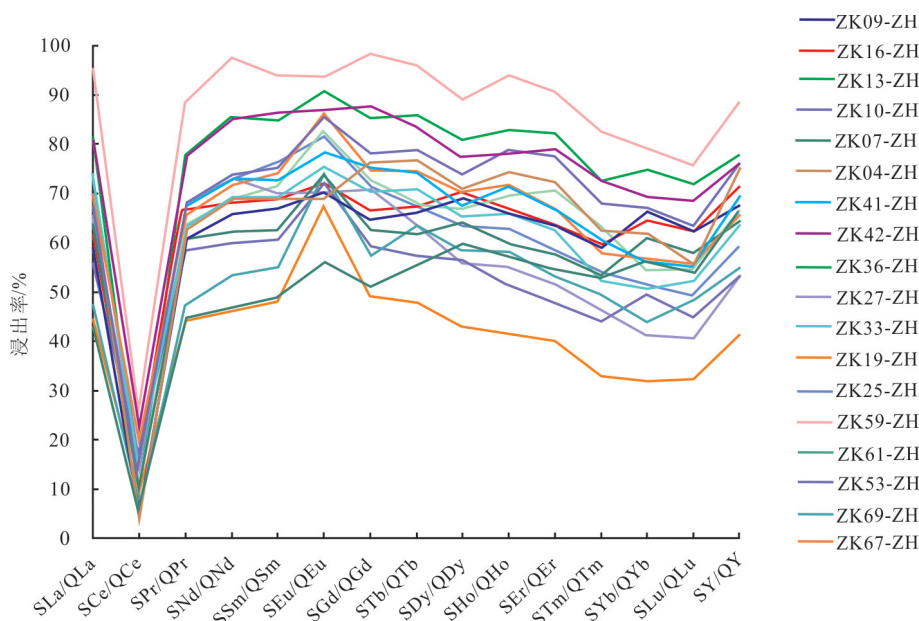


图 9 矿石各稀土氧化物浸出率分布图

Fig.9 The leaching rate distribution diagram of each rare earth oxides

石中被再吸附从而富集成矿,该过程可细分以下阶段及应具备的基本条件为:

(1) 水介质环境。地表的腐殖质使得渗入地下的水溶液呈弱酸性,风化壳的水介质环境呈中性-弱酸性。由于原岩矿物粒度及组成不同、矿物抗风化能力不同等,导致岩石风化不均匀,形成的花岗岩风化壳为一个由上至下各分层内应力由弱至强的开放体系(李永秀等,2014),其中的薄膜水、孔隙水和吸附水组成的风化水溶液是驱动稀土元素迁移的载体及离子交换的重要介质;该风化水溶液的化学组成、pH值和水动力条件对元素的迁移富集具有控制作用。

(2) 稀土元素解离和迁移。异地或原地水溶液在氧化环境下作用于花岗岩风化壳,其中携带的稀土矿质中, Ce^{3+} 不稳定而转化为 Ce^{4+} (王中刚等,1989), Ce^{4+} 离子半径小,离子电位高,配位能力较强,在弱酸环境下相对容易形成氢氧化物沉淀或被黏土矿物吸附(Rankin et al., 1976; Marsh, 1991; 王长兵等,2021),Eu离子也有相似的性质;因此,在稀土元素解离和迁移后的最终归属体中,无论是矿石亦或浸出相溶液中的Ce和Eu离子相对其他稀土离子明显亏损。

(3) 稀土元素吸附。在强烈的风化作用下,花岗岩的许多造岩矿物被风化成了以高岭石、埃洛石为主的黏土矿物,这些黏土矿物颗粒微小,比表面积大,携带表面电荷,因此具吸附性和离子交换性。稀土离子随风化水溶液酸性流体沿风化壳剖面向下渗透运移过程中,沿途在不同层位反复被黏土矿物吸附和解吸,不断进行离子交换和叠加富集,为最终在适宜部位沉淀吸附并富集成矿奠定基础。

(4) 稀土元素富集。稀土元素的富集与花岗岩风化程度、层内应力大小、水溶液运移及黏土矿含量密切相关。从腐殖土层至全风化层,风化程度逐渐减弱,层内压力逐渐加大,酸性溶液携带稀土离子向下运移至全风化层,在这里被大量黏土矿物所吸附进而富集,形成含矿层。半风化层和弱风化层由于内部应力陡然增大,酸性水溶液运移至这些层位的能力逐渐减弱,黏土矿物含量急剧减少,无法吸附更多的稀土元素,所以这两层不是主要的含矿层。

5.2 地形地貌与风化壳和矿体露头的关系

研究区地貌类型多样,根据中山和中山丘陵地

貌特征,结合海拔高度及山体发育形态,作者总结出研究区3种地形地貌与风化壳和稀土矿体露头的关系,如图10所示。

(1) 倾缓山脊型。该地形的海拔主要在1300~2100 m,山脊倾缓绵长,风化壳发育,保存较好;山顶陡峭,剥蚀速率高,花岗岩风化壳不发育,基岩出露较多;山脚海拔较低,沟谷发育,流水冲刷严重,花岗岩风化壳鲜有保存。因此,倾缓山脊上可保存风化壳的全风化层和相应矿体露头(图10a)。

(2) 平缓山顶型。该地形的海拔在1800~2100 m,山顶宽厚绵长,起伏较小,花岗岩风化壳保存较好;山腰至山脚地势变得陡峭,风化壳发育不完整,多数风化壳的全风化层被剥蚀掉。因此,平缓山顶上可保存风化壳的全风化层和相应矿体露头(图10b)。

(3) 低缓山丘型。该地形的海拔主要在900~1200 m,以相对独立的馒头状山包为主,整体地势平缓,山顶山脚高差较小,山包与山包之间水系较为发达,每个独立山包的风化壳发育较为完整。因此,低缓山丘型独立山包上可保存风化壳的全风化层和相应矿体露头(图10c)。

6 结论

(1) 湿热的气候、相对平缓的地形使黑云母二长花岗岩风化壳发育保存良好;完整的风化壳由地表至基岩依次可分为腐殖土层、亚黏土层、全风化层、半风化层和弱风化层5个层位;稀土矿质以离子吸附方式呈层状、似层状定位富集于风化壳全风化层;残留风化壳和稀土矿体露头主要分布于倾缓山脊、平缓山顶和低缓山丘型独立山包。

(2) 矿石全相和浸出相稀土氧化物分析表明轻稀土元素的分异程度强于重稀土元素;配分曲线呈右倾平滑的浅“W”型;矿石类型为以轻稀土元素为主、中重稀土元素配分齐全的混合型稀土矿。

(3) 研究区离子吸附型稀土矿床的关键成矿过程可以概括为:风化壳原岩——花岗岩在遭受风化分解过程中,由引发风化分解并携带异地或原地解离的稀土离子或稀土氧化物矿质的化学溶液运移至风化壳,并沿该剖面向下渗透过程中,由腐殖土层经亚黏土层至全风化层,尽管各分层的岩石风化程度和黏土矿物含量较高,但其内应力由小逐步增大,导致风化水溶液向下渗透运移的

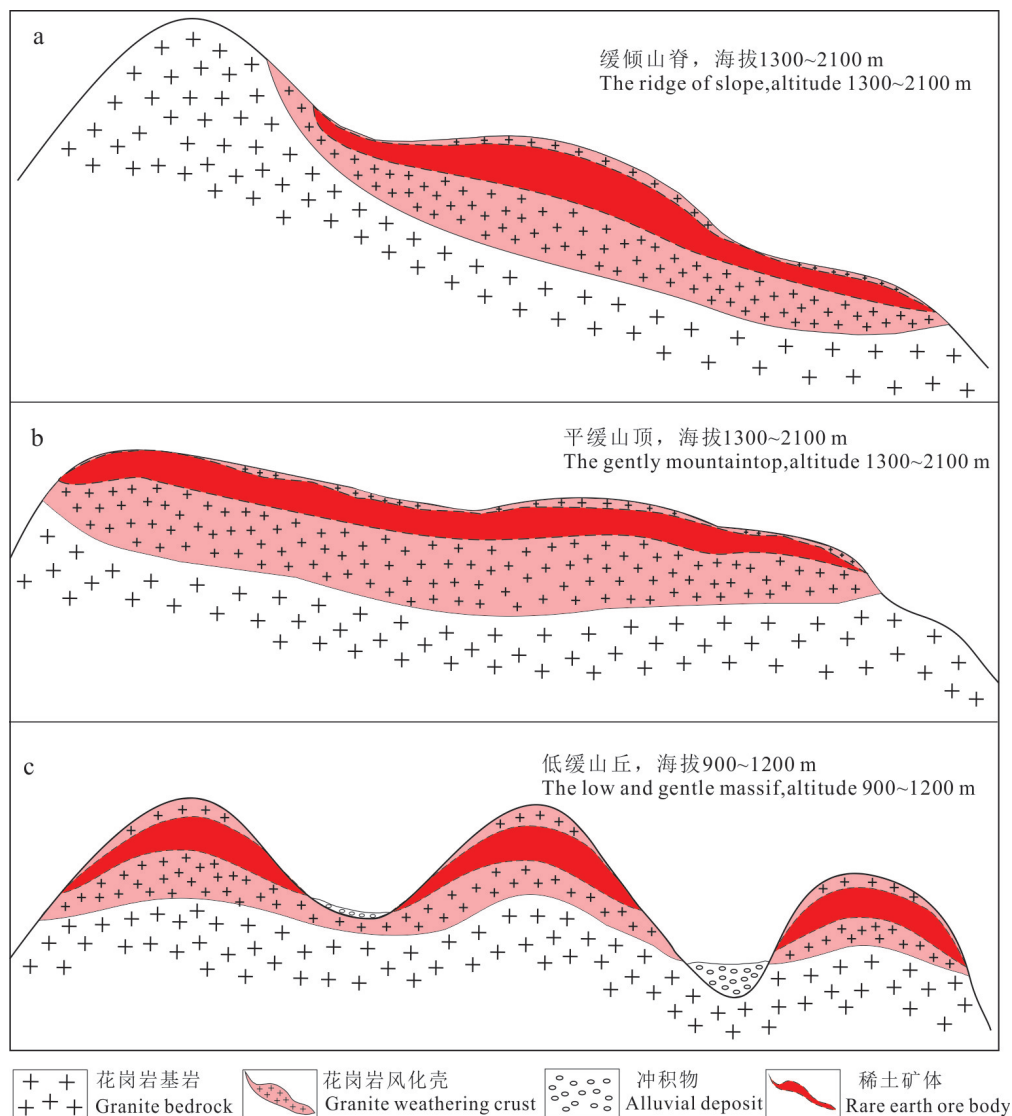


图10 澜沧县不同地形地貌与风化壳、矿体露头关系示意图

a. 缓倾山脊区; b. 平缓山顶区; c. 低缓山丘区

Fig.10 The characteristic diagram of relationships between landform with weathering crust and ore outcrop in Lancang County

a. The ridge of slope area; b. The gently mountaintop area; c. The low and gentle massif area

能力由强逐步减弱,由此决定各分层黏土矿物对稀土矿质的吸附能力由弱至强;随剖面进一步加深,经半风化层至弱风化层再到未风化的基岩,各分层因岩石风化程度急剧减弱导致黏土矿物含量相应急剧降低,同时,分层内应力则可能陡然增大,进而导致风化水溶液向下渗透运移的能力也急剧减弱,由此决定全风化层以下各分层不具备吸附和富集稀土矿质,形成矿体(层)的条件。显然,上述4个主要因素方面(内应力、渗透能力、风化程度、黏土矿物含量)在风化壳剖面中由上至下变化均在全风化层形成拐点并由此综合决定了稀

土矿体主要定位于风化壳全风化层。

致谢 衷心感谢匿名审稿专家对提高本文质量提供的宝贵意见。

References

Banfield J F. 1989. Apatite replacement and rare mobilization, fractionation and fixation during weathering[J]. Clays and Clay Minerals, 37(2):113-127.
 Braun J J and Muller J J. 1990. Cerium anomalies in lateritic profiles[J].

- Geochim et Cosmochim Acta, 54(3):781-789.
- Chi R A. 1988. Geological characteristics and prospecting criteria of ion-adsorption rare earth deposits in Fujian Province[J]. Chinese Rare Earths, 9(4):49-52(in Chinese with English abstract).
- Chi R A, Xu Z G, Wu Y X and Wang C W. 2007. Optimal conditions for preparing ultra-fine CeO₂ powders in a submerged circulative impinging stream reactor[J]. Journal of Rare Earths, (4):422-427.
- Dao J S, Huang J K, Jia K and Zhang W Z. 2017. Analysis of the genesis of ore deposit in Yunnan Province, East of rare earth ion adsorption type[J]. World Nonferrous Metal, 194, 196.
- Fan F P, Xiao H L, Chen L Z, Bao X Ming, Cai Y T, Zhang J and Zhu Y P. 2014. Mineralization and geological characteristics of elution-deposited rare earth ore from weathering crust in Pitou region southern Ganzhou[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 32(1):101-107(in Chinese with English abstract).
- Fang L H, Yuan D Y, Shao Y X, He W G, Liu X W and Zhang B. 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).
- He L Y and Wang S N. 1989. The type of ion adsorption rare earth ore in South China[J]. Chinese Rare Earths, 10(1): 39-44(in Chinese).
- He M S. 1990. Preliminary discussion on metallogenic characteristics and the method of quick evaluation of the ion-absorbed-type redeposit in weathering crust of granite[J]. Geology of Guangxi, 3(4): 87-91(in Chinese with English abstract).
- He Y, Cheng L, Li Y, Ran D J and Wei Q S. 2015. The mineralization mechanism of the ion adsorption type rare earths ore and prospecting marks[J]. Chinese Rare Earths, 36(4): 98-103(in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Zhang W L, Gu S Y and Chen P R. 2007. Comparison between REE granite and W-Sn granite in the Nanling region, South China and their mineralizations[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10):2321-2328(in Chinese with English abstract).
- Kong H L, Dong G C, Mo X X, Zhao Z D, Zhu D C, Wang S, Li R and Wang Q L. 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).
- Lan X J, Zhang B T, Lu W J, Zhao X D, Li X L, Wang M B, Han C and Wang Y J. 2021. Ore controlling factors and ore-search prospect of rare-earth deposits of the ion adsorption type in the Menghai area Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 57(4):935-946(in Chinese with English abstract).
- Ling H F, Shen W Z, Sun T, Jiang S Y, Jiang Y H, Ni P, Gao J F, Huang G L, Ye H M and Tan Z Z. 2006. Genesis and source characteristics of 22 Yanshanian granites in Guangdong Province; study of element and Nd-Sr isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(11): 2687-2703(in Chinese with English abstract).
- Li J W, Long Y K and Lu F Q. 2005. The genesis of regolith REE deposits in Jiangmen area, Guangdong Province[J]. West-China Exploration Engineering, 9(1): 101-104(in Chinese with English abstract).
- Li J Y, Zhu L J and Chen Y. 1998. Rare earth element distribution in weathering crusts of carbonate rocks, Guizhou Province [J]. Carologica Sinica, 17(1):15-24(in Chinese with English abstract).
- Li X B and Li S j. 2012. Developing building materials used Cenxi red rare earth rich ore parent rock to guard against waste of rare earth[J]. Chinese Rare Earths, 33(5): 99-102(in Chinese with English abstract).
- Li Y X. 2014. Ion adsorption rare earth resources and their green Extraction[M]. Beijing: Chemical Industry Press. 1-350(in Chinese).
- Mao J W, Yang Z X, Xie G Q, Yuan S D and Zhou Z H. 2019a. Critical minerals: International trends and thinking[J]. Mineral Deposits, 38(4):689-698(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Yuan S D, Xie G Q, Song S W, Zhou Q, Gao Y B, Liu X, Fu X F, Cao J, Zeng Z L, Li T G and Fan X Y. 2019b. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st Century [J]. Mineral Deposits, 38(5): 935-969(in Chinese with English abstract).
- Marsh J S. 1991. REE and fractionation and Ce anomalies in weathering Karoo dolerite[J]. Chemical Geology, 90:189-194.
- Ming T X, Zhu D L, Hou S G, Feng W J, Zhu Y Z and Tang Z. 2013. Characteristics of REE in the Zhuopan alkaline rockmass complex and prospecting, Yongping, Yunnan[J]. Mineral Exploration, 4(6): 609-615(in Chinese with English abstract).
- Ming T X, Tang Z, Bao C F, Li R, Zhan D Q, Yang Q B, Hao X F and Yu H J. 2021. Prospect, research progress and distribution characteristics of rare earth minerals in Yunnan Province[J/OL]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2365.TG.20210820.1413.022.html>(in Chinese).
- Mo X X, Shen S Y, Zhu Q W, Xu T R, Wei Q R and Tan J, Zhang S L and Cheng H L. 1998. Volcanics-ophiolite and mineralization of middle-southern part in Sanjiang area of southwestern China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 44-47(in Chinese).
- Nesbitt H W. 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during a grano-diorite [J]. Nature, 297:206-210.
- Peng T P, Wang Y J, Fan W M, Liu D Y, Shi Y R and Miao L C. 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 with English abstract).
- Rankin P C and Childs C W. 1976. Rare-earth elements in iron-manganese concretions from some New Zealand soils[J]. Chemical Geology, 18: 55-64.
- Tang X Z, Li M N and Yang D. 1998. The superficial view to classify the ion absorbed rare earth deposit[J]. Hunan Nonferrous Metals, 14(6):1-4(in Chinese with English abstract).
- Walter A V, Nahon D, Flicteaux R, Girard J P and Melfi A J. 1995. Behaviour of major and trace elements and fractionation of REE under tropical weathering of a typical apatite-rich carbonation from Brazil[J]. Earth Plan Science Review, 136(2):591-602.
- Wang C B, Ni G Q, Zhai L, Wu R L, Li C Q, Ma X, Zhang Z J and

- Yang C P. 2021. Ce geochemical characteristics of granite weathering crust and its prospecting significance: A case study of Chahai ion adsorption rare earth deposit in western Yunnan[J]. Mineral Deposits, 40(5):1013-1028(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Wang R j, Li J K, Zhao Z, Yu Y, Dai J J, Chen Z H, Li D X, Qu W J, Deng M C, Fu X F, Sun Y and Zhen G D. 2013a. 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).
- Wang D H, Zhao Z, Yu Y, Zhao T, Li J K, Dai J J, Liu X X and He H H. 2013b. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources[J]. Rock and Mineral Analysis, 32(5): 796-802(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Wang R J, Sun Y, Li J K, Zhao Z, Zhao T, Qu W J, Fu X F, Jiang S Y, Huang H G, Feng W J, Xu P, Li S M, Huang X P, Zhou H, Zhu Y X, Tu Q j, Li X R, Fang Y P and Zhou Y Y. 2016. Review of achievements in the three-type rare mineral resources(rare resources, rare earth and rarely scattered resources)survey in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(5): 569-580(in Chinese with English abstract).
- Wang J B and Ruan D Y. 1989. Evolution and reconcentration of Helling type acidic volcanic rock series[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 7(2): 68-72.
- Wang Z G, Yu X Y and Zhao Z H. 1989. Geochemistry of rare earth elements[M]. Beijing: Science Press. 321-342(in Chinese).
- Wang Z, Chen Z Y, Zhao Z, Chen B F and Zou X Y. 2019. REE mineral and geochemical characteristics of Neoproterozoic metamorphic rocks in South Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 38(4): 837-850(in Chinese with English abstract).
- Yang D H and Xiao G M. 2011. Regional metallogenic regularities of the ion adsorption type of rare earth deposits in Guangdong province[J]. Geology and Resources. 20(6): 463-468(in Chinese with English abstract).
- Yang Y Q, Wang D H, Sun Y, Zhao Z, Liu S B, Wang C H and Guo W M. 2021. Review on research and exploration of the 3R mineral resources during the past 70 years by institute of mineral resources[J]. Mineral Deposits, 40(4): 655-692(in Chinese with English abstract).
- Yuan Z X, Li J K, Wang D H, and Zheng G D. 2012. The metallogenic regularity of rare earth deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-116(in Chinese).
- Zhang B T, Lan X J, Jin G, Li X L, Zhang Y S, Hu Z G, Sun L W, Wang X W, Zhang X L and Guo W. 2020. Geological characteristics and controlling factors of the Huilongka ion-adsorption type REE deposit in Lincang granite belt, Yunnan Province[J]. Geological Review, 66(2):380-392(in Chinese with English abstract).
- Zhang M, Li Y, He X C, Feng J L, Wang H K, Du J G and Wang S S. 2018. The mineralization characteristics study of ion-adsorption 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).
- Zhang Z H. 1990. A study on weathering crust ion adsorption type REE deposits, South China[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 5(1): 57-71(in Chinese with English abstract).
- Zhao D, Wang D H, Wang Z Z and Xiang J. 2014. The Study on extraction of hyperspectral remote sensing information of ion-adsorbed rare earth deposits in Yunnan-Myanmar area[J]. Mineral Deposits, 33(S): 1205-1206(in Chinese with English abstract).
- Zhao Z, Wang D H, Chen Z H and Chen Z Y. 2017. Progress of research on metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in the nanling range[J]. Acta Geologica Sinica, 91(12):2814-2827(in Chinese with English abstract).
- Zeng L X. 1989. Ion adsorption type rare earth ore was found in western Guizhou[J]. Guizhou Geology, (6):272(in Chinese).

附中文参考文献

- 池汝安. 1988. 福建离子吸附型稀土矿地质特征及其找矿标志[J]. 稀土, 9(4):49-52.
- 刁俊山, 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, 194, 196.
- 范飞鹏, 肖惠良, 陈乐柱, 鲍晓明, 蔡逸涛, 张洁, 朱意萍. 2014. 赣南陂头一带风化层淋积型稀土矿成矿地质特征[J]. 中国稀土学报, 32(1):101-107.
- 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.
- 贺伦燕, 王似男. 1989. 中国南方离子吸附型稀土矿[J]. 稀土, 10(1): 39-44.
- 何明珊. 1990. 花岗岩风化层离子吸附型稀土矿成矿特征及快速评价方法的初步探讨[J]. 广西地质, 3(4):87-91.
- 何耀, 程柳, 李毅, 冉登基, 韦青松. 2015. 离子吸附型稀土矿的成矿机理及找矿标志[J]. 稀土, 36(4): 98-103.
- 华仁民, 张文兰, 顾晟彦, 陈培荣. 2007. 南岭稀土花岗岩-钨锡花岗岩及其成矿作用的对比[J]. 岩石学报, 23(10):2321-2328.
- 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.
- 蓝信杰, 张保涛, 卢文姬, 赵宪东, 李星亮, 王明波, 韩成, 王禹杰. 2021. 云南勐海地区离子吸附型稀土矿控矿因素及找矿前景[J]. 地质与勘探, 57(4):935-946.
- 凌洪飞, 沈渭洲, 孙涛, 蒋少涌, 姜耀辉, 倪培, 高剑峰, 黄国龙, 叶海敏, 谭正中. 2006. 广东省 22 个燕山期花岗岩的源区特征及成因:元素及 Nd-Sr 同位素研究[J]. 岩石学报, 22(11): 2687-2703.
- 李杰伟, 龙耀坤, 卢方全. 2005. 广东江门地区风化层型稀土元素矿床成因探讨[J]. 西部探矿工程, 9(1):101-104.
- 李景阳, 朱立军, 陈筠. 1998. 贵州碳酸盐岩风化层稀土元素分布特征[J]. 中国岩溶, 17(1):15-24.
- 李学彪, 黎绍杰. 2012. 采用岑溪红稀土富矿母岩开发建材警惕稀土浪费[J]. 稀土, 33(5):99-102.

- 李永秀. 2014. 离子吸附型稀土资源与绿色提取[M]. 北京: 化学工业出版社. 1-350.
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 袁顺达, 周振华. 2019a. 关键矿产——国际动向与思考[J]. 矿床地质, 38(4):689-698.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 宋世伟, 周琦, 高永宝, 刘翔, 付小方, 曹晶, 曾载淋, 李通国, 樊锡银. 2019b. 21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 38(5):935-969.
- 明添学, 朱多录, 侯蜀光, 冯文杰, 朱悦彰, 唐忠. 2013. 云南卓潘碱性杂岩体稀土元素特征及找矿远景分析[J]. 矿产勘查, 4(6):609-615.
- 明添学, 唐忠, 包从法, 李蓉, 詹冬琴, 杨清标, 郝学峰, 余海军. 2021. 云南省稀土矿分布特征、研究进展与展望[J/OL]. 中国稀土学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2365.TG.20210820.1413.022.html>.
- 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.
- 汤洵忠, 李茂楠, 杨殿. 1998. 离子型稀土矿分类之浅见[J]. 湖南有色金属, 14(6):1-4.
- 王长兵, 倪光清, 瞿亮, 伍荣林, 李灿清, 马鑫, 张子军, 杨春鹏. 2021. 花岗岩风化壳中 Ce 地球化学特征及其找矿意义——以滇西岔河离子吸附型稀土矿床为例[J]. 矿床地质, 40(5):1013-1028.
- 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[J]. 中国地质, 40(2): 361-370.
- 王登红, 赵芝, 于扬, 赵汀, 李建康, 代晶晶, 刘新星, 何哈哈. 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[J]. 岩矿测试, 32(5): 796-802.
- 王登红, 王瑞江, 孙艳, 李建康, 赵芝, 赵汀, 屈文俊, 付小方, 江善元, 黄华谷, 冯文杰, 徐平, 李胜苗, 黄新鹏, 周辉, 朱永新, 涂其军, 李新仁, 方一平, 周园园. 2016. 中国三稀(稀有稀土稀散)矿产资源调查研究成果综述[J]. 地球学报, 37(5): 569-580.
- 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.
- 王臻, 陈振宇, 赵芝, 陈斌峰, 邹新勇. 2019. 赣南新元古代变质岩稀土矿物及其地球化学特征[J]. 矿床地质, 38(4):837-850.
- 杨大欢, 肖光铭. 2011. 广东省离子吸附型稀土矿区域成矿规律研究[J]. 地质与资源, 20(6): 463-468.
- 杨岳清, 王登红, 孙艳, 赵芝, 刘善宝, 王成辉, 郭维明. 2021. 矿产资源研究所“三稀”矿产研究与找矿实践 70 年历程[J]. 矿床地质, 40(4):655-692.
- 袁忠信, 李建康, 王登红, 郑国栋. 2012. 中国稀土矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社. 1-116.
- 张保涛, 蓝信杰, 金刚, 李星亮, 张永三, 胡兆国, 孙璐伟, 王向伟, 张修龙, 郭伟. 2020. 云南临沧花岗岩带回龙卡离子吸附型稀土矿床地质特征和控制因素[J]. 地质论评, 66(2):380-392.
- 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.
- 张祖海. 1990. 华南风化壳离子吸附型稀土矿床[J]. 地质找矿论丛, 5(1):57-71.
- 赵汀, 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.
- 赵芝, 王登红, 陈郑辉, 陈振宇. 2017. 南岭离子吸附型稀土矿床成矿规律研究新进展[J]. 地质学报, 91(12):2814-2827.
- 曾励训. 1989. 贵州西部发现离子吸附型稀土矿[J]. 贵州地质, (6): 272.