

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.162>



# 滇西腾冲—梁河地区土官寨离子吸附型稀土矿床形成条件及找矿预测

张彬<sup>1</sup>, 马国桃<sup>1</sup>, 高儒东<sup>2</sup>, 曾招金<sup>2</sup>, 汪亮<sup>2</sup>, 左正龙<sup>2</sup>, 黄帅科<sup>2</sup>

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081

2. 中国冶金地质总局昆明地质勘查院, 云南昆明 650203

**摘要:** 滇西腾冲—梁河地区是近年来寻找离子吸附型稀土矿床的热点地区, 但关于该类型矿床在滇西高海拔地区的控矿因素、形成条件等研究接近空白。通过分析土官寨稀土矿床的风化壳结构、矿体垂向—走向变化特征, 总结了区域成矿地质条件和找矿标志。滇西腾冲—梁河地区与花岗岩有关的离子吸附型稀土矿主要受控于母岩稀土元素丰度和地形, “高山丘陵区”和“盆—山过渡带”内的“低山丘陵区”是有利成矿地形区。基于上述认识, 对江东地区开展了小范围找矿预测, 取得了良好的找矿效果。

**关键词:** 滇西; 离子吸附型; 稀土矿; 成矿条件; 找矿预测; 矿床学。

中图分类号: P618.7

文章编号: 1000—2383(2018)08—2628—10

收稿日期: 2018—03—06

## Formation Conditions and Prospecting Prediction of Tuguanzhai Ion-Adsorption Type REE Deposit in Tengchong-Lianghe Area

Zhang Bin<sup>1</sup>, Ma Guotao<sup>1</sup>, Gao Rudong<sup>2</sup>, Zeng Zhaojin<sup>2</sup>, Wang Liang<sup>2</sup>, Zuo Zhenglong<sup>2</sup>, Huang Shuaike<sup>2</sup>

1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China

2. Kunming Geological Prospecting Institute, China Metallurgical Geology Bureau, Kunming 650203, China

**Abstract:** Tengchong-Lianghe area in western Yunnan is becoming a hot area for ion-adsorption type REE deposit prospecting. However, there is few study on the ore-controlling factors and formation conditions of this type of deposit in high altitude areas in western Yunnan. In this paper, we have analyzed the composition of weathering crust and the variation of orebody in vertical-strike of Tuguanzhai deposit. We consider that the ion-adsorption type REE deposit is controlled by REE of parent rock and topography. The mountainous and hilly regions and low mountains and hills are favorable mineralization regions. 8 favorable areas which have satisfactory ore-prospecting results have been found in Jiangdong area, indicating the effectiveness of the prospecting method.

**Key words:** western Yunnan; ion-adsorption type; REE deposit; metallogenetic condition; prospecting prediction; ore deposit.

稀土元素因其特殊而广泛的用途被誉为“工业维生素”, 是战略性高新技术设备制造不可或缺的功能材料和结构材料, 是国内外公认的新兴产业发展的战略性资源 (Yang *et al.*, 2013; 王登红等, 2013a)。离子吸附型稀土矿床是我国南方特有的稀

土矿床类型, 具有中重稀土含量高、赋存浅易于开采等优点, 是世界稀土金属的重要来源 (Kynicky *et al.*, 2012)。自 20 世纪 70 年代赣南龙南离子吸附型稀土矿被发现以来, 前人针对矿床分布、成矿母岩特征、成矿机制、找矿预测等方面展开了大量的研究

基金项目: 中国地质调查局项目(No.DD20179604)。

作者简介: 张彬(1984—), 男, 工程师, 主要从事矿床学研究。ORCID: 0000-0001-6653-8979. E-mail: cdzbin@163.com

引用格式: 张彬, 马国桃, 高儒东, 等, 2018. 滇西腾冲—梁河地区土官寨离子吸附型稀土矿床形成条件及找矿预测. 地球科学, 43(8): 2628—2637.

(吴澄宇等,1989;池汝安和田君,2007;袁忠信等,2012;刘新星等,2016),并相继在广东、广西、云南、东南亚等地屡有发现(Sanematsu *et al.*, 2009; Maulana *et al.*, 2014; Bern *et al.*, 2017; 赵芝等,2017; 李自静和刘琰,2018).滇西腾冲—梁河地区位于北纬 $24^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ,中酸性侵入岩广泛发育(杨启军等,2009;曹华文等,2013),具有良好的离子吸附型稀土矿床的成矿基础(沈敢富,2002;李建忠等,2017),但关于该类型矿床在滇西高海拔地区的控矿因素、形成条件等研究接近空白.因此,本文对滇西腾冲—梁河地区土官寨离子吸附型稀土矿成矿条件

进行了分析和总结,探讨了区域成矿潜力,为进一步寻找该类稀土矿床提供依据.

## 1 成矿背景

研究区位于滇西腾冲岩浆杂岩带,主要发育元古界、二叠系及新近系,其他地层缺失或断失,其中古元古界高黎贡山岩群( $Pt_1G.$ )为一套层状无序的构造岩层,变质程度达角闪岩相,主要岩性为黑云母二长片麻岩、二云二长片麻岩、石英片岩、二长石英

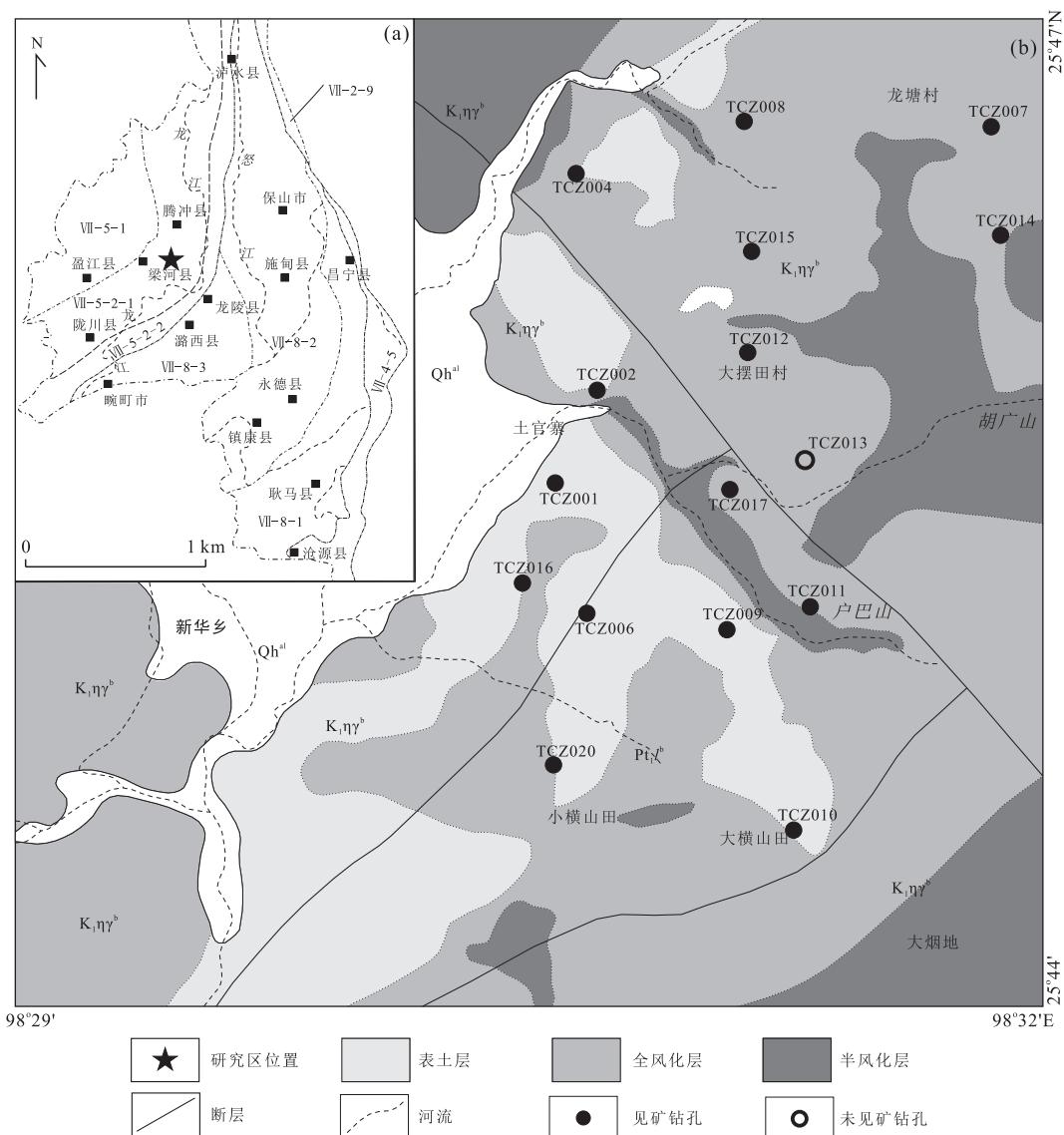


图1 滇西土官寨稀土矿区地质图

Fig.1 The geological map of Tuguanzhai deposit area in western Yunnan

图a据潘桂堂等(2009)修改.VI-5-1.拉达克—南冈底斯一下察隅—铜壁关岩浆弧;VI-5-2-1.腾冲—梁河岩浆杂岩及陆内滞后火山弧(T-N);VI-5-2-2.高黎贡山活化基地残块—岩浆杂岩带;VI-8-1.耿马被动陆缘( $E-T_2$ );VI-8-2.保山碳酸盐台地( $E-T_2$ );VI-8-3.耿马被动陆缘( $Z-T_2$ );VI-4-5.昌宁—孟连蛇绿混杂岩带( $Pz_2$ );VI-2-9.碧罗雪山—崇山岩浆弧(P-T).Qh<sup>4l</sup>.第四系淤泥、砂、砾;K<sub>1</sub>γγ<sup>b</sup>.早白垩世中粒黑云母二长花岗岩

片岩等;二叠系邦读组( $P_1b$ )岩性组合为一套变质石英细砂岩、粉砂岩、绢云母板岩等;新近系为内陆断陷湖盆沉积,可分为中新统南林组( $N_1n$ )和上新统芒棒组( $N_2m$ ),岩性主要为一套砾岩、石英砂岩、泥岩夹煤线。岩浆岩以中酸性侵入岩为主,形成时代主要为三叠纪、早白垩世及古近纪,是腾冲—梁河岩浆弧的组成部分,其中三叠纪花岗岩岩石类型为浅灰色中粒二云母花岗岩,A/CNK 值为 1.11~1.20,为强过铝质,可能与后碰撞伸展背景下古老地壳熔融相关(锆石 U-Pb 年龄为  $232.1 \pm 5.6$  Ma)(邹光富等,2011);早白垩世花岗岩岩石类型复杂多样,主要有二长花岗岩( $115.8 \pm 1.0$ ~ $139.6 \pm 2.3$  Ma)(丛峰等,2010,2011;谢韬等,2010)、花岗闪长岩( $115.2 \pm 1.0$  Ma)(毛琼等,2016)、及闪长岩( $122.6 \pm 0.8$  Ma)(丛峰等,2011)等,其中二长花岗岩是区内离子吸附型稀土矿主要成矿母岩,地球化学特征显示其明显富集轻稀土、具 Eu 负异常,富集 Rb、Th、U 及 K 等大离子亲石元素,相对亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P 及 Ti;古近纪花岗岩锆石 U-Pb 年龄为  $51.4 \pm 0.4$ ~ $60.7 \pm 0.6$  Ma(丛峰等,2010;谢韬等,2010;高永娟等,2014a,2014b),岩性主要为中粗粒黑云母二长花岗岩、中粗粒钾长花岗岩,具较强的片麻理构造。区域

构造形迹以韧—脆性断裂为主,主要构造方向为 NE 向。

矿区出露地层为元古界高黎贡山群烂泥坝组 a 岩段( $Pt_1l^a$ )(图 1),岩性为一套片麻岩、花岗片麻岩夹少量石英片岩等。早白垩世花岗岩( $K_1\eta\gamma^b$ )大面积出露,岩性主要为中粒黑云母二长花岗岩、二长花岗岩、片麻状花岗岩,零星见细粒黑云母二长花岗岩脉;其中中粒黑云母二长花岗岩占主体,主要成分为斜长石(25%~30%)、钾长石(25%~30%)、石英(22%~28%)、黑云母(3%~15%)和普通角闪石(2%~3%),与高黎贡山群烂泥坝组( $Pt_1l^a$ )呈断层接触关系,被古近纪花岗岩( $E\eta\gamma$ )侵入。区内构造以断裂为主,主构造方向为 NE 向,并被晚期次 NW 向脆性断层错断,糜棱岩化发育。

## 2 矿体特征及配分类型

矿体由 16 个钻探工程控制,其中 TCZ013 未见矿,控制矿体南北长约 4 000 m,东西宽约 2 500 m,向东侧山顶矿体未圈闭,且有变厚变富集的趋势;矿体主要赋存于花岗岩风化壳的全风化层中(图 2),厚度为 1~32.4 m,平均厚度为 9.35 m,矿体品位为

表 1 土官寨矿区稀土元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 1 The REE ( $10^{-6}$ ) results of composite sample in Tuguanzhan deposit area

样品	TCZ007-ZH1	TCZ007-ZH2	TCZ007-ZH3	TCZ007-ZH4	TCZ007-ZH5	TCZ007-ZH6	TCZ007-ZH7	TCZ007-ZH8
La	215.14	382.76	213.50	160.73	173.51	169.65	179.21	177.80
Ce	292.22	284.47	287.52	278.53	297.17	285.78	293.90	310.43
Pr	44.16	74.00	40.91	31.20	34.16	32.07	33.52	34.34
Nd	175.02	279.21	164.02	127.06	135.13	125.89	131.43	136.49
Sm	22.03	50.40	30.44	21.32	22.59	20.24	20.50	21.35
Eu	2.21	6.10	3.63	2.41	2.51	2.30	2.48	2.54
Gd	13.25	40.16	28.81	18.16	19.05	16.65	16.93	17.43
Tb	1.13	4.67	4.32	2.38	2.51	2.00	1.99	2.04
Dy	4.33	21.70	23.39	11.99	12.32	9.52	9.11	9.54
Ho	0.79	4.04	4.44	2.24	2.23	1.72	1.66	1.73
Er	2.58	11.05	11.67	5.95	5.82	4.51	4.45	4.57
Tm	0.31	1.40	1.40	0.73	0.69	0.51	0.51	0.54
Yb	2.43	9.51	8.99	4.89	4.65	3.35	3.45	3.70
Lu	0.24	1.02	0.93	0.48	0.46	0.34	0.36	0.36
Y	16.43	101.74	136.75	63.13	59.73	40.67	41.76	43.35
LREE	94.76	84.65	77.03	84.97	86.09	88.92	89.18	89.13
HREE	5.2	15.4	23.0	15.0	13.9	1.1	10.8	10.9
$\delta\text{Eu}$	0.37	0.40	0.37	0.36	0.36	0.37	0.40	0.39
LREE/HREE	18.09	5.51	3.35	5.65	6.19	8.02	8.24	8.20
$\Sigma\text{REE}$	792.27	1 272.22	960.72	731.18	772.53	715.19	741.25	766.22
TREEO	917.58	1 473.45	1 112.67	846.82	894.71	828.31	858.49	887.41

注:测试单位为西南冶金地质测试所;测试仪器为美国 PE 公司 Nex ION 300x ICP-MS。

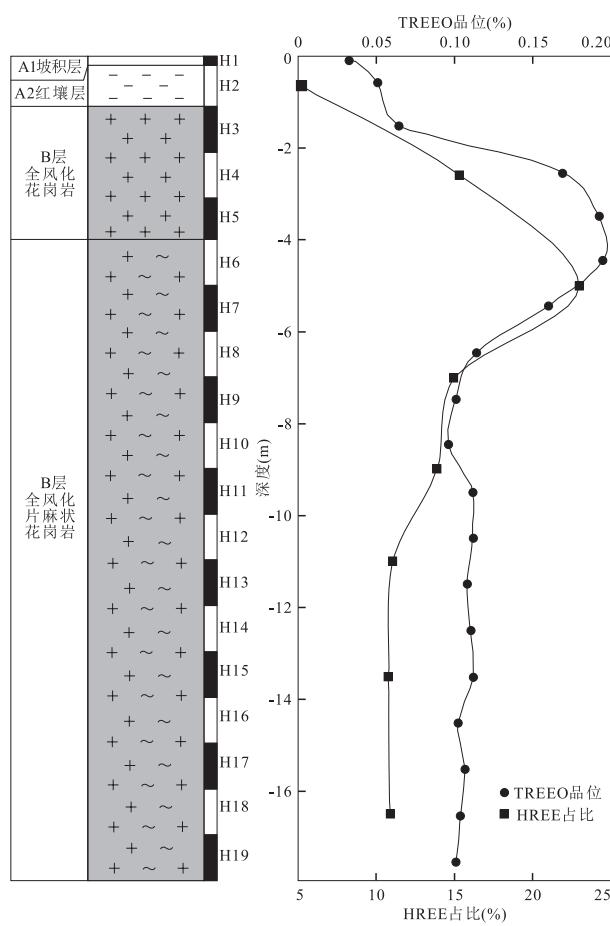


图2 土官寨矿区TCZ007钻孔素描图

Fig.2 TCZ007 drilling sketch of Tuguanzhai deposit area

0.05%~0.19%，平均品位为0.09%；组合分析样离子相稀土矿浸出率在20.42%~54.49%之间，平均为37.95%（3件样品浸出率分别为54.49%、38.95%、20.42%）。

矿石组分简单，由花岗岩风化而成，继承了原岩矿物成分，主要为石英、粘土矿物及少量黑云母和未完全风化的长石等。如表1所示，该矿床以轻稀土为主，轻稀土占比在77.03%~94.76%之间，平均为86.84%；从稀土含量来看，目前价格较高的元素Pr占4.22%~5.50%、Nd占18.76%~25.73%，属于富钕轻稀土矿；而重稀土中Y元素含量最高，配分值最高达 $105 \times 10^{-6}$ ，占比在3.09%~9.77%之间，且稀土富集程度越高，Y元素所占比例越高。整体上，稀土元素总量品位越高，重稀土所占百分含量越大（图2），说明稀土富集程度越高，越有利于重稀土的富集。

与母岩（数据引自邹光富等，2014）相比，风化壳 $\Sigma$ REE为 $715.2 \times 10^{-6} \sim 1272.2 \times 10^{-6}$ ，平均为 $843.9 \times 10^{-6}$ ，母岩 $\Sigma$ REE为 $80.55 \times 10^{-6} \sim$

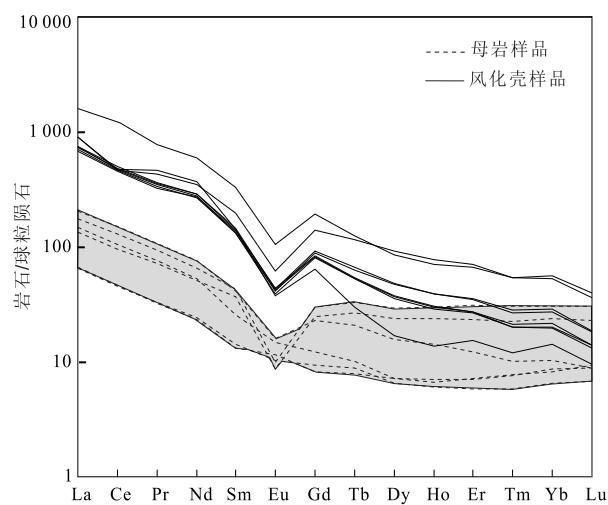


图3 研究区样品的稀土元素球粒陨石标准化配分模式

Fig.3 Chondrite-normalized REE pattern of samples in the study area

母岩样品数据引自邹光富等（2014）

$362.80 \times 10^{-6}$ ，平均为 $171.9 \times 10^{-6}$ ，风化壳 $\Sigma$ REE较母岩富集5倍左右；风化壳 $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE比值为3.35~18.09，母岩为2.06~6.95，两者大致相当，风化壳的轻稀土元素更为富集；风化壳 $\delta$ Eu为0.28~1.08，母岩为0.27~0.88。图3显示，风化壳岩石与母岩均为右倾型轻稀土富集、具明显的Eu负异常，两者在稀土元素组成上具有明显的继承性；与母岩相比，风化壳稀土元素右倾趋势更为显著，可能暗示风化作用过程中粘土矿物对稀土离子的吸附能力由La至Lu逐渐变弱。

### 3 岩体风化壳特征及矿化变化分带

#### 3.1 岩体风化壳特征

土官寨矿区位于腾冲市新华乡第四系盆地的东侧，地势西低东高，气候温热潮湿，岩体化学风化作用强烈，形成广泛分布的风化壳。风化壳厚度一般为10~33 m，其厚度、风化程度与地形地貌关系密切，如盆—山接触带坡度缓倾的TCZ001处花岗岩风化壳厚度达33 m，而坡度相对陡倾的TCZ202、TCZ016等处花岗岩风化壳厚度一般在10 m左右。

风化壳根据风化程度的不同，从地表至基岩呈现层状结构，各分层之间为过渡渐变，由上而下可分为表土层（A层）、全风化层（B层）、半风化层（C层）、基岩层（D层）。

（1）表土层：可以细分为坡积层（A1）和红土层（A2），其中坡积层厚0.2~1.5 m，呈灰黑色、黑褐

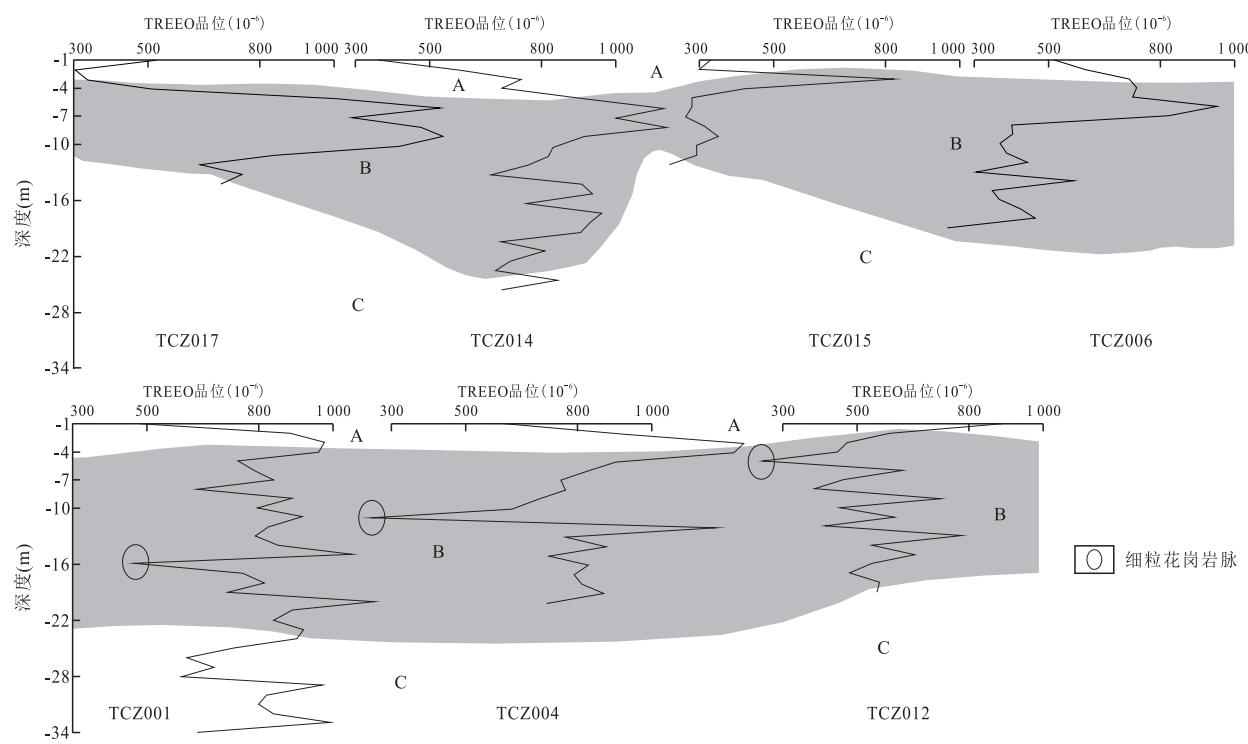


图 4 风化壳稀土氧化物总量(TREEO)垂向变化

Fig.4 Vertical distribution of characteristic parameters showing TREEO in weathering crust

色,主要由黑色粘土及植物根系组成,见少量石英颗粒,一般不含矿。红土层厚0.1~3.4 m,呈砖红色,部分呈灰黄色,主要由粘土组成,石英颗粒约占10%;该层平面上基本连续,但厚度变化较大,具有一定的含矿性。

(2)全风化层:以浅肉红色、浅灰黄色、灰白色为主。原岩结构构造已消失,但大部分矿物特征仍保留,其中长石均已风化为高岭土等粘土矿物,常保留板状假晶,黑云母、角闪石等暗色矿物风化呈褐色斑状,而石英抗风化能力较强故呈砂粒状。该层为稀土矿体主要赋存层位,一般厚度为5~20 m,由上而下风化程度逐渐变弱。

(3)半风化层:以灰白色、浅灰黄色为主。岩石较为松散,基本保留原岩结构构造,长石大部分已风化成高岭土等粘土矿物,零星含花岗岩硬质夹块。靠近全风化层处局部含矿。

(4)基岩层:岩石坚硬,除少量长石微弱风化外,岩石保留花岗岩原岩结构构造;不含矿。

### 3.2 稀土矿体垂向变化特征

稀土矿体主要赋存于全风化层中(图2,图4),在表土层和半风化层中局部也有矿化显示,如钻孔TCZ001、TCZ012等。从岩性特征来看,一般出现细粒花岗岩脉的位置稀土品位明显较差,其原因还有

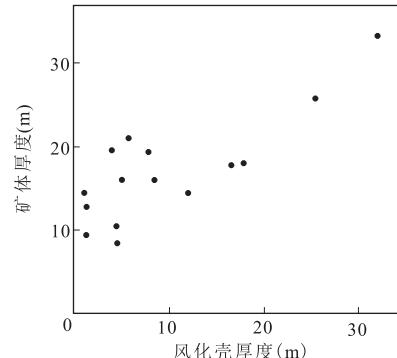


图 5 钻孔风化壳厚度与矿体厚度关系

Fig.5 The comparison of thickness of bored weathering crust and orebody thickness

待进一步研究,但显而易见的是细粒花岗岩脉粒度细、矿物颗粒均匀,较强的抗风化能力造成岩石风化较弱,含稀土矿物解离程度不够,粘土矿物吸附稀土元素的能力也较弱。

完整的风化壳剖面中稀土元素含量常具有一定的规律性,按其垂向上的变化特征可归纳为4类:(1)弓背式,分为正常式和浅伏式;(2)喇叭式,分为深潜式和表露式;(3)波浪式;(4)直线式(张祖海,1990;池汝安和田君,2007)。图2和图4显示,多数钻孔,如TCZ006、TCZ014、TCZ015、TCZ017等,呈现

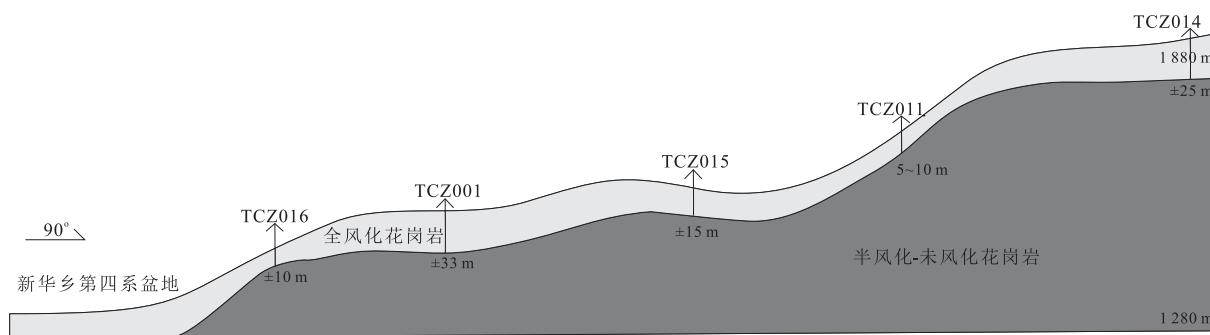


图6 滇西土官寨稀土矿区地形与花岗岩风化壳关系示意图

Fig.6 The schematic drawing of the relation between terrain and the thickness of weathering granite of Tuguanzhai deposit area in western Yunnan

两头小、中间大的“凸”字形，且均为突变关系，稀土富矿体一般分布在深度为2~10 m的范围内，向深部变贫或无矿，具“浅伏式”分布特征；而TCZ001则表现为明显的波浪式特征，且向深部品位没有明显降低的趋势；TCZ012和TCZ004虽然受细粒花岗岩脉的影响，形态较为复杂，但总体表现出“浅伏式”特点。

### 3.3 稀土矿体走向变化特征

风化壳厚度表征了风化程度的深浅，风化壳厚度越大风化程度就越高，相应的矿体品位及厚度均富而厚(张祖海, 1990)。图5表明，土官寨矿区矿体厚度与风化壳厚度呈明显的正相关关系，风化壳厚度越厚，矿体也就越厚，矿体品位也有类似的正相关关系。

从钻孔施工情况来看，矿区风化壳厚度与地形坡度密切相关(图6)，靠近山脚平坦地段，风化壳厚度为10~33 m(局部见球形风化)，山坡上厚度为±15 m，局部地形较陡部位风化壳厚度在5 m左右，而山顶厚度相对稳定，为±25 m，从山坡向上至(平坦)山顶、向下至(平缓)山脚，风化壳有逐渐变厚的趋势，矿体厚度、品位也相应变大、变富。地形坡度对该类型矿床具有明显的控制作用，表现为地形平缓部位风化壳(稀土矿体)厚而富，陡坡部位风化壳(稀土矿体)薄而贫。

## 4 成矿条件分析

滇西腾冲—梁河地区属于亚热带气候区，区内大面积分布中酸性岩浆岩，与我国赣南、岭南地区相似，具有形成离子吸附型稀土矿的优越条件。

### 4.1 中酸性岩体

中酸性侵入岩体是形成与花岗岩有关的离子吸附型稀土矿的先决条件，这些岩体为成矿提供了必

要的物质基础。腾冲—梁河地区侵入岩大约占总面积的39%，岩石类型以中酸性花岗岩为主，仅在部分地区发育基性玄武岩和基性侵入岩脉，岩浆活动主要集中在中生代三叠纪、白垩纪和新生代古近纪(杨启军等, 2009；丛峰等, 2010；Qi et al., 2015)。区内有来利山锡矿床、大松坡锡矿床、百花脑稀土多金属矿床等(沈敢富, 2002；曹华文等, 2013；Cao et al., 2016)，是我国重要的锡多金属、三稀资源成矿带。

形成离子吸附型稀土矿床的花岗岩母岩需要具有较高的稀土元素丰度。南方五省(区)的研究结果表明，稀土成矿花岗岩稀土总量的下限值为 $112 \times 10^{-6}$ 。统计结果表明(表2)，本区花岗岩类的稀土总量远远高于该下限值，三叠纪花岗岩、早白垩世花岗岩、古近纪花岗岩ΣREE均值分别为 $261.20 \times 10^{-6}$ 、 $265.83 \times 10^{-6}$ 、 $260.40 \times 10^{-6}$ ，ΣREE最大值分别为 $506.96 \times 10^{-6}$ 、 $697.54 \times 10^{-6}$ 、 $304.26 \times 10^{-6}$ ，具备形成离子吸附型稀土矿的先决条件。

稀土元素赋存矿物的易风化程度是形成离子吸附型稀土矿的关键条件，如主要赋存在氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、褐帘石、长石等易解离矿物中，则有利于形成离子吸附型稀土矿床；如主要赋存在磷钇矿、锆英石等抗风化能力强的矿物中，则不利于离子吸附型稀土矿床的形成。赣南龙南矿区、寻乌矿区、广东姑婆山矿区，稀土元素主要赋存于易解离的副矿物中，95%以上的造岩矿物对全岩稀土贡献率只有5%~50%(杨学明和张培善, 1992；Bao and Zhao, 2008)。另外也有稀土元素主要赋存于造岩矿物中的报道，如陆川县清湖矿区造岩矿物稀土元素占有率达90%以上(袁忠信等, 2012)，广西龙江矿区长石、白云母等造岩矿物提供主要的物质来源(陆一敢等, 2015)。而关于滇西腾冲地区花岗岩中稀土元素赋存

表 2 滇西腾冲—梁河地区主要期次中酸性侵入岩的稀土元素总量

Table 2 The  $\Sigma$ REE of acidic-intermediate intrusive rock of Tengchong-Lianghe area in western Yunnan

测区花岗岩	$\Sigma$ REE( $10^{-6}$ )	平均值( $10^{-6}$ )	LREE/HREE	资料来源
三叠纪花岗岩	88.21~506.96	261.20	2.15~8.64	邹光富等(2011)
花岗岩	62.20~697.54	268.04	1.64~9.57	罗改等(2012);邹光富等(2014)
白垩纪 花岗闪长岩	165.24~477.93	260.88	2.97~12.83	毛琼等(2016)
花岗岩 闪长岩	175.86~226.08	199.79	1.87~3.40	高永娟等(2014a)
合计	62.20~697.54	265.83	1.64~12.83	
古近纪花岗岩	158.85~304.26	260.40	2.96~6.37	高永娟等(2014b)
新岐花岗岩(百花脑)	67.80~412.19	215.07	0.34~10.63	周新平等(2015)
邦棍尖山花岗岩(龙安)	260.31~809.59	421.00	3.08~8.99	巫嘉德(2014)

状态的研究较少,大量的野外采样结果表明,早白垩世花岗岩似乎更具备形成离子吸附型稀土矿的潜力,古近纪花岗岩则成矿性稍弱,而二者的稀土元素总量相差无几(表 2),可能是由于稀土元素在母岩中的赋存状态不同造成的。

#### 4.2 地形条件

赣南、粤中南、桂东南等东部地区的离子吸附型稀土矿床主要产于海拔小于 550 m、相对高差为 250~60 m 的丘陵地带,陡坡地形、“V”型山谷、尖棱形山顶(脊)不利于离子吸附型稀土矿的形成(张祖海,1990;刘新星等,2016).但滇西腾冲—梁河地区平均海拔在 1 000 m 以上,土官寨矿区钻孔 TCZ014 海拔达 1 880 m,与我国东部地区明显不同。

腾冲—梁河地区地形地貌受近北北东向泸水—龙陵—瑞丽断裂带和喜山期新构造的双重作用影响,形成大致呈北北东向展布的“沟—谷—盆”体系,在“沟—谷—盆”两侧及周缘多为低缓山丘和平缓山坡、山脊,从区内已发现的矿床来看,其主要分布于这类地形地貌条件下。由低到高区内地形地貌可大致分为(第四系)盆地、“盆—山过渡带”、“高山丘陵区”3 种样式(图 7),其中“盆—山过渡带”又可分为“低山丘陵区”和“陡山区”,区域上离子吸附型稀土矿床(龙安稀土矿、土官寨稀土矿、核桃寨稀土矿、百花脑稀土矿等)无一例外地均处于“低山丘陵区”和“高山丘陵区”等坡度较缓部位;而(第四系)盆地虽然坡度条件有利,但多数为河流冲积的砾石堆积,不具备离子吸附型稀土矿的成矿条件;“陡山区”则虽然经受同样的化学风化作用,但由于坡度较陡,形成的风化层容易在雨水、重力等因素的作用下被带离而难以保存,也不具备离子吸附型稀土矿的成矿条件。

#### 4.3 气候条件

滇西腾冲—梁河地区为亚热带气候,第四纪以来湿热多雨,有利于化学风化作用的不断进行,加速

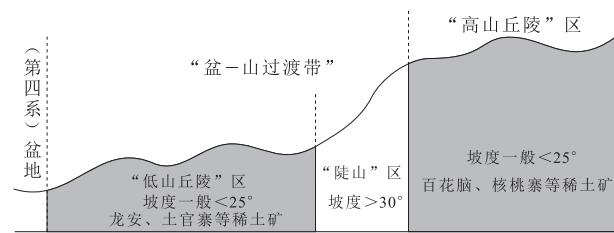


图 7 地形地貌对离子吸附型稀土矿床的控制作用示意图

Fig.7 The schematic drawing of the controlling effect of terrain and geomorphic condition to the ion-adsorption type REE deposit

了含矿母岩的解体。在适当的 pH 值及水介质环境下,原岩中含稀土的矿物风化、解离,且大部分转为稀土离子溶于水中,随地表水向下运动,同时长石类矿物高岭土化,具有高原子量、高原子价的稀土离子被高岭土等粘土矿物吸附、固定,不断富集(王登红等,2013b;何耀等,2015),从而在风化壳中成矿。

此外,有机物和微生物也可以加速原岩的风化作用。

### 5 找矿预测

#### 5.1 找矿标志

根据前述成矿条件分析的结果,笔者总结了滇西腾冲—梁河地区离子吸附型稀土矿的找矿标志:(1)母岩稀土元素丰度:区内花岗岩的高稀土丰度是成矿的先决条件;(2)岩性标志:一般具中粗粒、粗粒结构的花岗岩成矿性较好,而细粒花岗岩成矿性较差;(3)地貌标志:“低山丘陵区”和“高山丘陵区”等坡度较缓部位是成矿的有利地段;(4)风化壳标志:一般而言,风化壳厚度越大则矿体厚度越大,含矿性也越好。

#### 5.2 找矿预测及找矿效果

基于上述认识,笔者对腾—梁地区的江东地区

开展了小范围找矿预测,共圈定出8处预测区。其中勐养预测区稀土氧化物总量为 $400 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ ,最高达 $1480 \times 10^{-6}$ ,通过浅钻工程验证,花岗岩风化层厚度在20 m左右,矿体厚度一般为2~6 m,离子相稀土矿浸取率为41.18%,该重点区分布面积大于20 km<sup>2</sup>,具有寻找大型以上离子吸附型稀土矿的前景;茨竹园—白马头预测区捡块样稀土氧化物总量一般大于 $500 \times 10^{-6}$ ,通过浅钻工程验证,花岗岩风化层厚度约为10 m,矿体厚度约为5 m,具有寻找中一大型离子吸附型稀土矿的前景。另外在兴隆寨、野鸭塘、曼当、江东—红米场等预测区也有较好的找矿显示。

## 6 结论

(1)土官寨离子吸附型稀土矿床为富钕轻稀土矿床,矿体主要产于花岗岩风化壳的全风化层中。矿体垂向上以“浅伏式”为主,且细粒花岗岩脉一般不含矿;矿体纵向上受地形坡度控制明显,地形平缓部位风化壳(稀土矿体)厚而富,陡坡部位风化壳(稀土矿体)薄而贫。

(2)滇西腾冲—梁河地区离子吸附型稀土矿床主要产于“高山丘陵区”和“盆—山过渡带”内的“低山丘陵区”。

(3)根据滇西腾冲—梁河地区离子吸附型稀土矿床的找矿标志,笔者在江东地区开展了小范围找矿预测,取得了良好的找矿成果。

**致谢:**感谢审稿专家提出的宝贵意见,感谢成都地质调查中心范文玉教授级高工的指导和帮助,感谢中国冶金地质总局昆明地质勘查院万大福高工在野外调研中的帮助!

## References

- Bao, Z.W., Zhao, Z.H., 2008. Geochemistry of Mineralization with Exchangeable REY in the Weathering Crusts of Granitic Rocks in South China. *Ore Geology Reviews*, 33 (3—4): 519—535. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.03.005>
- Bern, C.R., Yesavage, T., Foley, N.K., 2017. Ion-Adsorption REEs in Regolith of the Liberty Hill Pluton, South Carolina, USA: An Effect of Hydrothermal Alteration. *Journal of Geochemical Exploration*, 172: 29–40. <https://doi.org/10.10303/100000203>
- Cao, H.W., Zhang, S.T., Lin, J.Z., et al., 2013. Geologic Characteristics and Tectonic Settings of Tin Deposits in West Yunnan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 40 (4): 457—467 (in Chinese with English abstract).
- Cao, H.W., Zhang, Y.H., Pei, Q.M., et al., 2016. U-Pb Dating of Zircon and Cassiterite from the Early Cretaceous Jiaoiguan Iron-Tin Polymetallic Deposit, Implications for Magmatism and Metallogeny of the Tengchong Area, Western Yunnan, China. *International Geology Review*, 59 (2): 234—258. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Chi, R.A., Tian, J., 2007. Review of Weathered Crust Rare Earth Ore. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 25 (6): 641—650 (in Chinese with English abstract).
- Cong, F., Lin, S.L., Xie, T., et al., 2010. Rare Earth Element Geochemistry and U-Pb Age of Zircons from Granites in Tengchong-Lianghe Area, Western Yunnan. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40 (3): 573—580 (in Chinese with English abstract).
- Cong, F., Lin, S.L., Zou, G.F., et al., 2011. Magma Mixing of Granites at Lianghe: In-Situ Zircon Analysis for Trace Elements, U-Pb Ages and Hf Isotopes. *Science in China (Series D)*, 41 (4): 468—481 (in Chinese).
- Gao, Y.J., Lin, S.L., Cong, F., et al., 2014a. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope Compositions of Zircons from Lower Cretaceous Diorite-Dykes in Lianghe Area, Western Yunnan, and their Geological Implications. *Geological Bulletin of China*, 33 (10): 1482—1491 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y.J., Lin, S.L., Cong, F., et al., 2014b. Zircon U-Pb Geochronology, Zircon Hf Isotope and Bulk Geochemistry of Paleogene Granite in the Tengchong-Lianghe Area, Western Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 88 (1): 63—71 (in Chinese with English abstract).
- He, Y., Cheng, L., Li, Y., et al., 2015. The Mineralization Mechanism of the Ion Adsorption Type Rare Earths Ore and Prospecting Marks. *Chinese Rare Earths*, 36 (4): 98—103 (in Chinese with English abstract).
- Kynicky, J., Smith, M.P., Xu, C., 2012. Diversity of Rare Earth Deposits: The Key Example of China. *Elements*, 8 (5): 361—367. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.5.361>
- Li, J.Z., Lu, S.L., Wu, W.X., et al., 2017. New Cognition and Discovery of Rare Earth Deposits in the Xiaolonghe Tin-REE Polymetallic Orefield of Tengchong in Yunnan Province. *Geological survey of China*, 4 (2): 9—21 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.J., Liu, Y., 2018. Ore Types and Genesis of Weathered Deposits in the Mianning-Dechang REE Belt, Western Sichuan Province, Southwestern China. *Earth Science*,

- 43(4):1307—1320 (in Chinese with English abstract).  
<https://doi.org/dqkx.2018.722>
- Liu, X.X., Chen, Y.C., Wang, D.H., et al., 2016. The Metallogenetic Geomorphic Condition Analysis of the Ion-Ab sorbing Type Rare Earths Ore in the Eastern Nanling Region Based on DEM Data. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(2):174—184 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y.G., Fang, K., Lu, J.K., et al., 2015. Metallogenetic Regularity Comparison of Rare Earth Elements Deposits of Ion-Adsorption Type in Longjiang of Guangxi. *Journal of Guilin University of Technology*, 35(4):660—666 (in Chinese with English abstract).
- Luo, G., Jia, X.C., Yang, X.J., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Southern Menglian Granite in Tengchong Area of Western Yunnan Province and Its Tectonic Implications. *Geological Bulletin of China*, 31(2):287—296 (in Chinese with English abstract).
- Mao, Q., Zou, G.F., Lin, S.L., et al., 2016. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Geochemistry of Mengyang Granodiorite Intrusion in Lianghe Area, Western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 35(7):1196—1206 (in Chinese with English abstract).
- Maulana, A., Yonezu, K., Watanabe, K., 2014. Geochemistry of Rare Earth Elements(REE) in the Weathered Crusts from the Granitic Rocks in Sulawesi Island, Indonesia. *Journal of Earth Science*, 25(3):460-472.<https://doi.org/10.1007/s12583-014-0449-z>
- Qi, X.X., Zhu, L.H., Grimmer, J.C., et al., 2015. Tracing the Transhimalayan Magmatic Belt and the Lhasa Block Southward Using Zircon U-Pb, Lu-Hf Isotopic and Geochemical Data: Cretaceous-Cenozoic Granitoids in the Tengchong Block, Yunnan, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 110: 170-188. <https://doi.org/10.13039/501100002855>
- Sanematsu, K., Murakami, H., Watanabe, Y., et al., 2009. Enrichment of Rare Earth Elements (REE) in Granitic Rocks and Their Weathered Crusts in Central and Southern Laos. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 60(11—12):527-558.<https://doi.org/10.9795/bullgsj.60.527>
- Shen, G.F., 2002. Weathering Crust of Baihuanao Granite: A Potential Superlarge-Scale Rb, Cs, Y, Sc , Quartz and Albite Ore Deposit. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 21(3):182—184 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.H., Wang, R.J., Li, J.K., et al., 2013a. The Progress in the Strategic Research and Survey of Rare Earth, Rare Metal and Rare-Scattered Elements Mineral Re- sources. *Chinese Geology*, 40(2):361—370 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Zhao, Z., Yu, Y., et al., 2013b. Progress, Problems and Research Orientation of Ion-Adsorption Type Rare Earth Resources. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5):796—802 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C.Y., Huang, D.H., Guo, Z.X., 1989. REE Geochemistry in the Weathering Process of Granites in Longnan County, Jiangxi Province. *Acta Geological Sinica*, 63(4):349—362 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.D., 2014. The Magmatic Origin of Banggungianshan and Polunshan Granitoids in Tengchong Block, Western Yunnan (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Xie, T., Lin, S. L., Cong, F., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating for K-Feldspar Granites in Lianghe Region, Western Yunnan and Its Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenica*, 34(3):419—428 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q.J., Xu, Y.G., Huang, X.L., et al., 2009. Geochronology and Geochemistry of Granites in the Tengliang Area, Western Yunnan: Tectonic Implication. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5):1092—1104 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. J., Lin, A. J., Li, X. L., et al., 2013. China's Ion- Adsorption Rare Earth Resources, Mining Consequences and Preservation. *Environmental Development*, 8:131-136. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.03.006>
- Yang, X.M., Zhang, P.S., 1992. Existing State and Mass Balance of Rare Earth Element in Granites. *Chinese Rare Earths*, 13(5):6—11 (in Chinese).
- Yuan, Z.X., Li, J.K., Wang, D. H., et al., 2012. China's Rare Earth Deposit Metallogenetic Regularity. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, Z. H., 1990. A Study on Weathering Crust Ion Adsorption Type Ree Deposits, South China. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 5(1):57—71 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Wang, D.H., Pan, H., et al., 2017. REE Geochemistry of a Weathering Profile in Guangxi, Southern China, and Genesis of Ion-Adsorption Type REE Deposit. *Earth Science*, 42(10):1697—1706 (in Chinese with English abstract).<https://doi.org/dqkx.2017.115>
- Zhou, X.P., Qi, H. W., Hu, R. Z., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of Granites in the Tengchong Xinqi Area, Western Yunnan and Their Tectonic Implication. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 34(1):139—148 (in Chinese with English abstract).

- Zou, G.F., Lin, S.L., Li, Z.H., et al., 2011. Geochronology and Geochemistry of the Longtang Granite in the Lianghe Area, Western Yunnan and Its Tectonic Implications. *Geotectonica et Metallogenesis*, 35(3): 439—451 (in Chinese with English abstract).
- Zou, G.F., Mao, Y., Lin, S.L., et al., 2014. Zircon U-Pb Age and Geochemistry of the Shibancun Biotite Monzo-Granites and Its Tectonic Implications in Mangshi County, Western Yunnan. *Geological Review*, 60(6): 1425—1436 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 池汝安,田君,2007.风化壳淋积型稀土矿评述.中国稀土学报,25(6):641—650.
- 曹华文,张寿庭,林进展,等,2013.滇西锡矿带地质特征与成矿构造背景.成都理工大学学报(自然科学版),40(4): 457—467.
- 丛峰,林仕良,谢韬,等,2010.滇西腾冲—梁河地区花岗岩锆石稀士元素组成和U-Pb同位素年龄.吉林大学学报(地球科学版),40(3):573—580.
- 丛峰,林仕良,邹光富,等,2011.梁河花岗岩岩浆混合作用:锆石微量元素、U-Pb和Hf同位素示踪.中国科学(D辑),41(4):468—481.
- 高永娟,林仕良,丛峰等,2014a.滇西梁河地区闪长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄、Hf同位素特征及其地质意义.地质通报,33(10):1482—1491.
- 高永娟,林仕良,丛峰,等,2014b.滇西腾冲—梁河古近纪花岗岩锆石U-Pb定年、Hf同位素及地球化学.地质学报,88(1):63—71.
- 何耀,程柳,李毅,等,2015.离子吸附型稀土矿的成矿机理及找矿标志.稀土,36(4):98—103.
- 李建忠,陆生林,吴文贤,等,2017.云南省腾冲市小龙河锡稀土多金属矿田新知及其稀土矿的发现.中国地质调查,4(2):9—21.
- 李自静,刘琰,2018.川西冕宁—德昌REE矿带风化型矿床的矿石类型及成因.地球科学,43(4):1307—1320.  
<https://doi.org/dqkx.2018.722>
- 刘新星,陈毓川,王登红,等,2016.基于DEM的南岭东段离子吸附型稀土矿成矿地貌条件分析.地球学报,37(2): 174—184.
- 陆一敢,方科,卢见昆,等,2015.广西龙江矿区离子吸附型稀土矿成矿规律对比.桂林理工大学学报,35(4): 660—666.
- 罗改,贾小川,杨学俊,等,2012.滇西腾冲地区勐连花岗岩体南段LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及其构造意义.地质通报,31(2):287—296.
- 毛琼,邹光富,林仕良,等,2016.滇西梁河勐养花岗闪长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其构造意义.地质通报,35(7):1196—1206.
- 沈敢富,2002.百花脑花岗岩风化壳:潜在超大型的铷、铯、钇、钪、石英和钠长石矿床.矿物岩石地球化学通报,21(3):182—184.
- 王登红,王瑞江,李建康,等,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,等,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.
- 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,63(4): 349—362.
- 巫嘉德,2014.滇西特提斯造山带腾冲地体邦棍尖山和坡仑山花岗岩成因(硕士学位论文).合肥:中国科学技术大学.
- 谢韬,林仕良,丛峰,等,2010.滇西梁河地区钾长花岗岩锆石LA-ICP-MS U-Pb定年及其地质意义.大地构造与成矿学,34(3):419—428.
- 杨启军,徐义刚,黄小龙,等,2009.滇西腾冲—梁河地区花岗岩的年代学、地球化学及其构造意义.岩石学报,25(5): 1092—1104.
- 杨学明,张培善,1992.花岗岩中稀土元素的赋存状态及质量平衡研究.稀土,13(5):6—11.
- 袁忠信,李建康,王登红,等,2012.中国稀土矿床成矿规律.北京:地质出版社.
- 张祖海,1990.华南风化壳离子吸附型稀土矿床.地质找矿论丛,5(1):57—71
- 赵芝,王登红,潘华,等,2017.广西某地花岗岩风化壳中稀土元素特征与iREE矿床成矿机制.地球科学,42(10): 1697—1706.<https://doi.org/dqkx.2017.115>
- 周新平,戚华文,胡瑞忠,等,2015.滇西腾冲新岐花岗岩年代学、地球化学及其构造意义.矿物岩石地球化学通报,34(1):139—148.
- 邹光富,林仕良,李再会,等,2011.滇西梁河龙塘花岗岩体LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学及其构造意义.大地构造与成矿学,35(3):439—451
- 邹光富,毛英,林仕良,等,2014.滇西芒市地区石板村黑云母二长花岗岩的年代学、地球化学特征及地质意义.地质论评,60(6):1425—1436.

罗改,贾小川,杨学俊,等,2012.滇西腾冲地区勐连花岗岩体