

云南中基性火山岩风化壳离子吸附稀土成矿作用分析 ——以腾冲龙井山安山岩风化壳型稀土矿床为例

曾招金¹⁾, 祝向平^{2, 3)*}, 张 彬³⁾, 高儒东¹⁾

1)中国冶金地质总局昆明地质勘察院, 云南昆明 650203; 2)成都理工大学, 四川成都 610059;

3)中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081

摘 要: 近年来在云南发现了多个离子吸附型稀土矿, 特别是滇西的腾冲—陇川地区、临沧—勐海地区成为了找矿突破最大、最受关注的地区。本次工作在腾冲火山岩带南部龙井山发现一套富含轻稀土的第四系中基性火山岩建造, 该含矿建造稀土元素丰度平均值达 532×10^{-6} 。经过系统的调查研究及采样工作, 结果表明腾冲龙井山新近纪中的辉石安山岩富含轻稀土, 为一种年轻火山岩形成的风化壳型稀土矿床, 矿体平均厚度 9.15 m, 平均品位(TREEO)0.11%, 矿体品位、厚度变化与风化壳厚度呈正相关。该中基性火山岩离子吸附型稀土矿床的发现丰富了云南稀土矿床类型。这种年轻的中基性火山岩型稀土矿的成矿地质背景、地球化学特征等, 为寻找中基性岩有关的稀土矿床提供参考。

关键词: 中基性火山岩; 离子吸附型稀土矿; 成矿作用; 腾冲龙井山; 云南

中图分类号: P594.2; P611 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.092601

Mineralization of Ion-adsorption Type Rare Earth in Intermediate-basic Volcanic Rocks: A Case Study of Rare Earth Deposits from Longjingshan, Tengchong, Yunnan Province

ZENG Zhao-jin¹⁾, ZHU Xiang-ping^{2, 3)*}, ZHANG Bin³⁾, GAO Ru-dong¹⁾

1) Kunming Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Kunming, Yunnan 650203;

2) Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;

3) Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081

Abstract: In recent years, many ion-adsorbed-type rare earth (IATRE) ore deposits have been found in Yunnan. Tengchong–Longchuan and Lincang–Menghai have become the most studied and prospected areas for IATRE ore deposits. In this study, a Quaternary intermediate-basic volcanic formation was found in the Longjingshan area within the southern Tengchong Volcanic Rock Belt. The average abundance of rare earth elements in the formation is 532×10^{-6} . Systematic investigation and sampling of the volcanic formation have shown that the pyroxene andesites in Longjingshan, Tengchong, belong to an IATRE ore deposit rich in light rare earth elements, which formed from young volcanic rocks. The orebody has an average thickness of 9.15 m, and an average grade (total rare earth element oxides, TREEO) of 0.11%, which varies from the average grade. The thickness of the orebodies is positively correlated with the thickness of the weathering shelf of the volcanic rocks. The discovery of an IATRE ore deposit in the Tengchong area adds to the types of rare earth ore deposits in Yunnan. The geological setting and geochemical characteristics of the young intermediate-basic volcanic rare earth ore deposit illustrates that rare earth deposits are related to intermediate-basic volcanic rock.

Key words: intermediate-basic volcanic rock; ion adsorption type rare earth mine; mineralization; Longjingshan, Tengchong; Yunnan

本文由中国地质调查局地质调查项目“滇西地区三稀等重要矿产地质调查”(编号: DD20179604)资助。

收稿日期: 2021-06-07; 改回日期: 2021-09-18; 网络首发日期: 2021-09-29。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 曾招金, 男, 1988 年生。工程师。主要从事固体矿产勘查及矿床学研究。通讯地址: 650203, 云南省昆明市盘龙区龙泉路 702 号。E-mail: 444782590@qq.com。

*通讯作者: 祝向平, 男, 1979 年生。博士, 教授级高级工程师。主要从事斑岩系统矿床研究与评价、矿产地质调查等工作。

通讯地址: 610081, 四川省成都市一环路北三段 2 号。E-mail: zhuxiangping3@hotmail.com。

稀土元素素有“工业味精”之称,具有大幅度提高其它产品的质量和性能的奇效,主要被应用于永磁材料、催化材料、发光材料等。随着近年来矿产地质调查的不断深入,在云南发现了大量分布于花岗岩、中酸性火山岩及变质岩风化壳中的离子吸附型稀土矿,在云南宣威、元谋—峨山、建水、临沧—勐海、腾冲—陇川等地区均有发现(刘殿蕊, 2020; 陆蕾等, 2020), 主要以花岗岩风化壳中的轻稀土为主。

在开展“滇西地区三稀等重要矿产地质调查”项目中,调查区内发现了土官寨、尖山脚、蕨叶坝、小龙河、百花脑、勐往、富东、回龙卡、户撒等一大批离子吸附型稀土矿产地(李建忠等, 2017; 张彬等, 2018; 曾凯等, 2019; 张保涛等, 2020), 以三叠纪、白垩纪花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿为主。然而,在腾冲火山岩南部龙井山一带发现了一处新近纪中基性火山岩离子吸附型稀土矿,矿床具有品位高、厚度大等特点,本文以滇西腾冲火山岩区龙井山稀土矿区七个典型钻孔为依托,研究风化壳中

元素地球化学特征,对成矿作用进行具体分析,进而探讨稀土元素在风化壳中的赋存规律,为寻找该类型稀土矿床成矿机理提供参考。

1 成矿地质背景

研究区位于云南省腾冲市南部,地处欧亚板块与印度板块碰撞带上,位于青藏高原东南缘,大地构造位置位于西南三江提斯造山带西南端,东以泸水—龙陵—瑞丽断裂带为界与保山地块相邻,西以密支那缝合带与西缅地块相接(戚学祥等, 2011)(图 1a)。因地处两个不同构造单元的交接处,腾冲地域内以发育的断裂构造、年轻的火山活动和强烈的地热为主要特征(图 1b)。区域构造形迹以韧性断裂为主,主要构造方向为 NE 向。

研究区广泛分布岩浆岩,以三叠纪、白垩纪酸性侵入岩和新近纪中基性火山喷出岩为主(图 2a)。三叠纪花岗岩岩石类型主要为浅灰色中粒二云母花岗岩、中粗粒正长花岗岩,锆石 U-Pb 年龄为 $218.0 \sim (232.1 \pm 5.6)$ Ma(周淑敏等, 2018; 邹光富等,

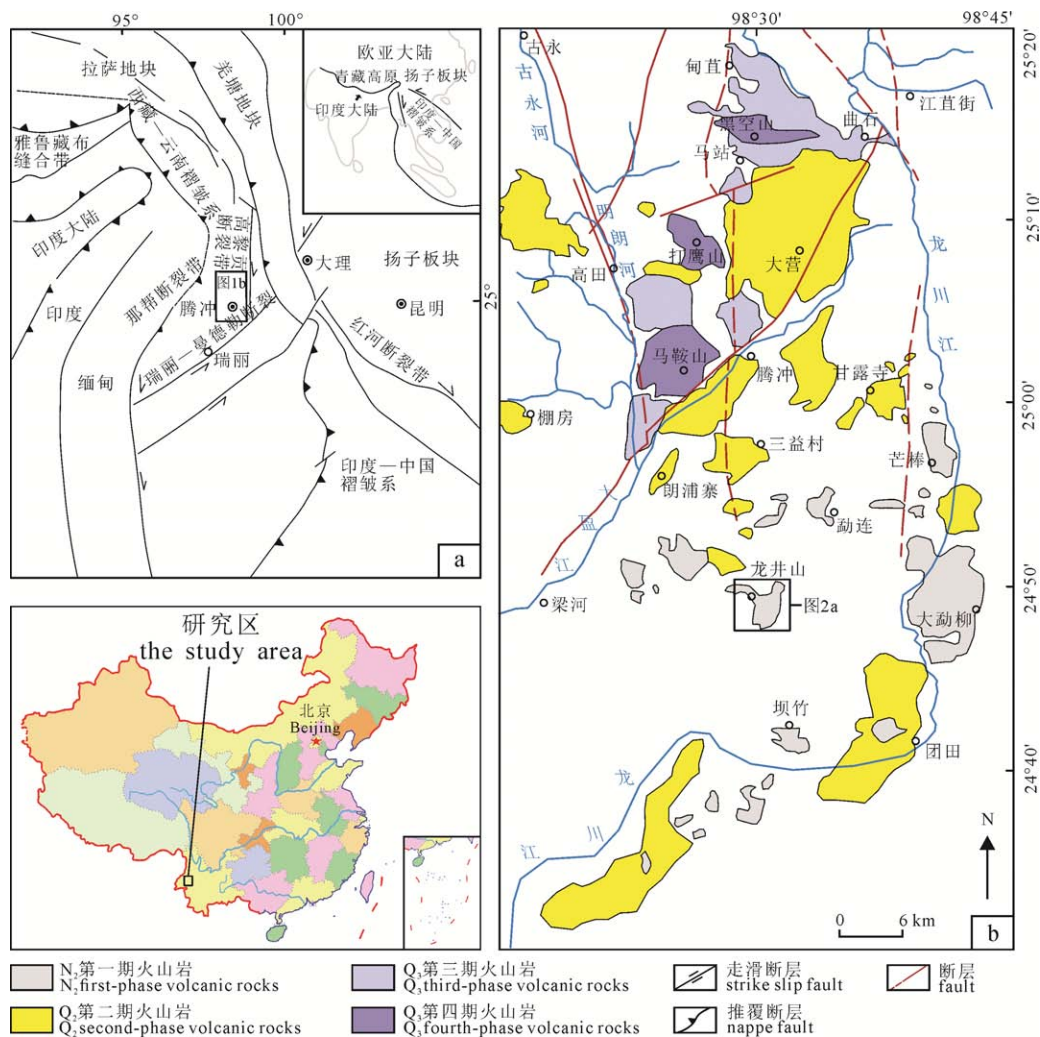


图 1 滇西腾冲地区区域地质背景(a, 戚学祥等, 2011)和新近纪以来火山岩分布图(b, 林木森等, 2017)

Fig. 1 Regional geology (a, after QI et al., 2011) and distribution map (b, after LIN et al., 2017) of volcanic rocks since Neogene in Tengchong area, Western Yunnan

2011); 早白垩纪花岗岩岩石类型主要为灰白色片麻状、眼球状中细粒花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为 $(115.8 \pm 1.0) \sim (127.9 \pm 2.0)$ Ma(丛峰等, 2010; 谢韬等, 2010; 万鑫等, 2018); 晚白垩纪花岗岩岩石类型主要为浅肉红色似斑状中细粒二长花岗岩, 锆石 U-Pb 年龄为 68.0~76 Ma(杨启军等, 2009; 林木森等, 2014); 新近纪火山岩岩石类型主要为灰紫色气孔状辉石安山岩、辉石玻基安山岩, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $(2.0 \pm 0.1) \sim (2.1 \pm 0.1)$ Ma(林木森等, 2017)。

2 稀土矿床的地质特征

2.1 含矿地层

在研究区腾冲火山岩南部龙井山一带的新近纪芒棒组的中基性火山岩风化壳中发现了离子吸附型稀土矿, 稀土矿成母岩为辉石安山岩(图 2), 矿化总体受中基性火山岩层位直接控制, 为稀土矿成矿地质体。风化壳全风化层(A)安山岩结构构造被完全破坏, 风化成因以黏土矿物为主的土层, 顶部主要为灰褐色腐殖土, 中、下部主要为浅黄色、土红色

黏土, 出露面积 0.55 km^2 , 钻孔控制厚度 1~7 m 不等, 在地势平坦处厚度较大; 风化壳强风化层(B)保留有原岩的结构构造, 但绝大部分长石已风化成高岭土, 出露面积 0.79 km^2 , 钻孔控制厚度 3~13 m 不等, 在山头及宽缓的山脊处厚度较大; 风化壳中风化层(C)原岩结构构造清晰易辨, 部分长石风化成高岭土, 出露于沟谷处或陡坡处, 分布面积 0.33 km^2 , 钻孔揭露厚度 $> 2 \text{ m}$ 。

龙井山中基性火山岩岩体总体呈 NE 向展布, 与区域构造方向一致, 受 NNE 向板场断裂和 NEE 向的八洞水断裂所影响。其中辉石安山岩深灰色, 斑状结构, 致密块状或气孔状构造, 斑晶由中长石(4%~10%)、普通辉石(2%~10%)组成, 中长石斑晶呈自形板状颗粒组成, 聚片双晶欠发育, 环带构造较发育, 辉石呈自形短柱状颗粒, 基质具交织结构, 主要由微晶斜长石(50%~67%)、微粒普通辉石(19%~34%)组成, 含少量玻璃质、绿泥石及金属矿物等。

辉石玻基安山岩深灰色, 斑状结构, 致密块状或气孔状构造, 斑晶由中长石(2%~12%)、普通辉石

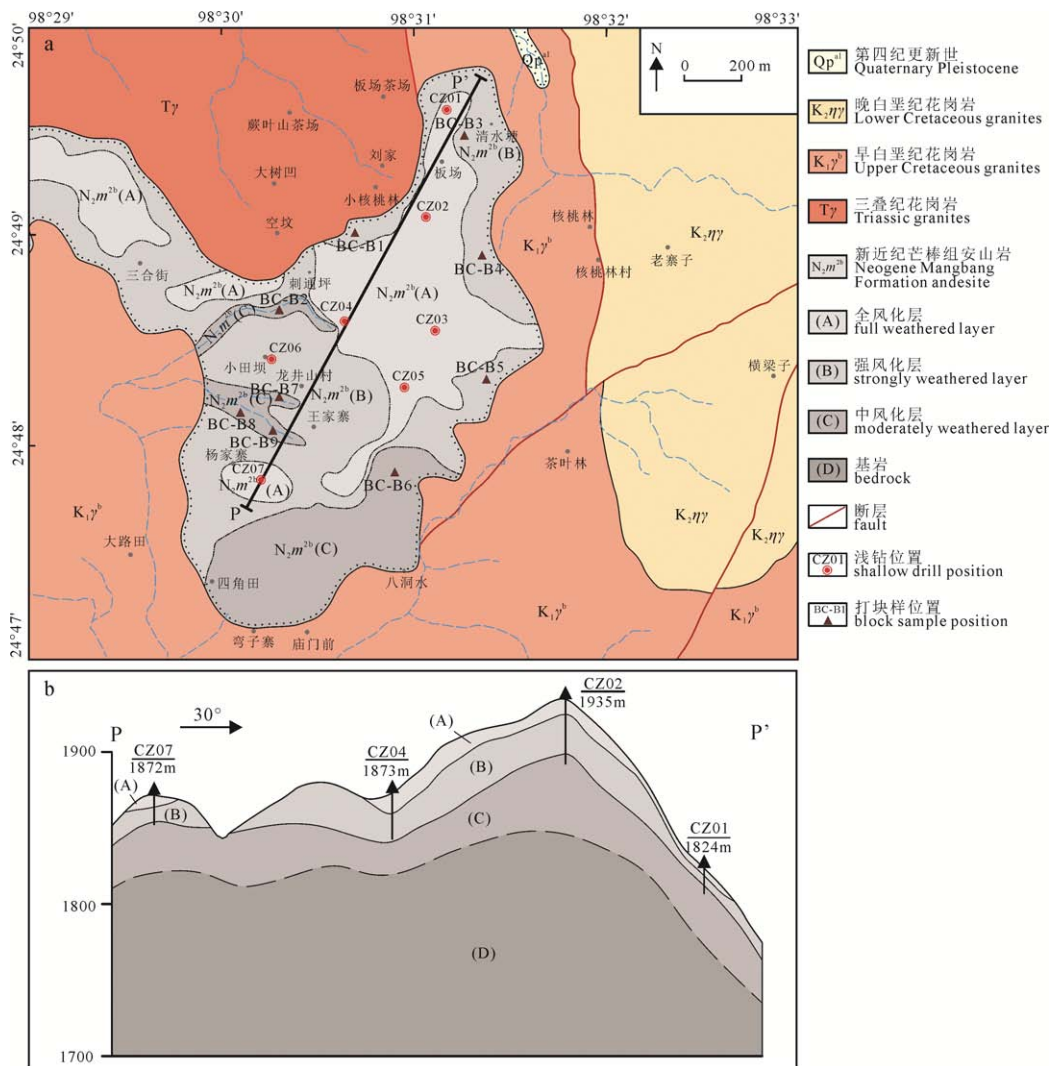


图 2 滇西龙井山稀土矿区地质图(a)及钻孔剖面图(b)

Fig. 2 Geological map (a) and drillhole profile (b) of Longjingshan deposit in western Yunnan

(4%~10%)组成, 中长石斑晶呈自形板状颗粒组成, 聚片双晶欠发育, 环带构造较发育, 辉石呈自形短柱状颗粒, 基质具玻晶交织结构, 主要由微晶斜长石(49%~61%)、微粒普通辉石(5%~12%)和中性玻璃质(23%~35%)组成, 含少量绿泥石及金属矿物等。

矿体主要产于辉石安山岩强风化层中, 少量产于靠近辉石安山岩强风化层的全风化层或中风化层中, 由 7 个浅钻工程控制, 矿体出露标高 1824~1937 m, 控制矿体南北长约 1500 m, 东西宽约 1300 m, 矿体呈似层状分布, 矿体厚度 4.81~16.52 m, 平均厚度 9.15 m, 矿体品位(TREEO) 0.08%~0.25%, 平均品位 0.11%(图 5)。

2.2 含矿岩系的岩石地球化学特征

采样地点位于云南省腾冲市龙井山安山岩离子吸附型稀土矿研究区, 在研究区安山岩岩体内采集 9 件岩石样品, 在本次施工的 9 个浅钻工程中采集 6 件风化壳样品, 单个样品重量约 2 kg。采样位置见图 2、图 5。

所有样品经室内自然风干, 送西南冶金地质测试中心完成样品主量、微量及稀土元素的分析, 主量元素采用 X 荧光法, 实验仪器为 PANalytical-Axios 型荧光仪, 相对误差(RE) < 5%, 相对偏差(RD) < 5%; 微量与稀土元素分析方法为电感耦合等离子质谱仪, 实验仪器为美国 PERKINELMER 公司 NexION 300x ICP-MS, 相对误差(RE) < 10%, 相对偏差(RD) < 10%。测试结果见表 1、表 2。

2.2.1 主量元素

表 1 中列出了研究区基岩分析数据, $\text{SiO}_2 = 63.92\% \sim 65.37\%$, $\text{K}_2\text{O} = 4.16\% \sim 4.44\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 3.01\% \sim 3.37\%$, 全碱含量较高; $\text{CaO} = 2.44\% \sim 3.76\%$, CaO 含量也较高; $\text{MgO} = 1.07\% \sim 1.80\%$, MgO 含量较低。在 TAS 图(图 3a)上火山岩样品的岩石类型为粗面岩、粗面英安岩, 腾冲龙井山新生代火山岩样品 SiO_2 含量变化不大, 主要显示为中基性岩的分布; ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 含量较高, 为亚碱性系列; 该区火山岩是一套粗面岩-粗面英安岩岩石组合(图 3a); K_2O 含量较高, 大部分样品属钾玄岩系列, 少量样品落入高钾钙碱性系列(图 3b)。

2.2.2 稀土元素

从表 2 可以看出, 研究区风化壳中稀土元素含量($\sum \text{REE} = 731 \times 10^{-6} \sim 1205 \times 10^{-6}$)是原岩中稀土元素含量($\sum \text{REE} = 493 \times 10^{-6} \sim 632 \times 10^{-6}$)的 1.48 ~ 1.91 倍, 说明风化壳中稀土元素含量不仅与母岩中稀土含量多少有关, 与后期风化过程中遭受的淋滤作用也有一定的关系, 反应了稀土元素在表生环境下较强的迁移能力。

研究区风化壳和基岩的稀土元素球粒陨石标准化模式图(图 4)表明, 龙井山安山岩样品具有比较相似的稀土元素配分模式, 曲线整体向右倾斜, 均发生了明显的轻重稀土分异, 在 LREE 区间斜率较陡, 而在 HREE 区间趋于平缓。同时可以看出风化壳中稀土元素含量明显高于基岩中稀土元素含量, 趋势基本一致, 显示风化壳内稀土元素是在继承基岩稀土元素特征的基础上进一步富集。

2.2.3 微量元素

研究区样品均表现出明显的大离子亲石元素富集和高场强元素相对亏损。富集 Rb、Th、La、Ce、Nd 等, 相对亏损 Nb、Ta、Y 等。LREE 与 HREE 表现出明显的分异, 具有高的原始地幔标准化(La/Yb_N) 比值、高的 La/Nb 比值、低的 Nb/La 比值(小于 1), Nb/U 比值较高; 相对较富 Zr, Zr/Y 比值较高(表 1)。

3 氧化型稀土矿床的深度变化特征

根据钻孔剖面(图 2, 图 5), 滇西龙井山稀土矿床随深度变化的特征如下:

龙井山氧化型稀土矿矿床为裸露地面的风化中基性火山岩风化壳, 稀土矿体主要赋存于强风化辉石安山岩中, 其次在靠近辉石安山岩强风化层的全风化层或中风化层中也有少量赋存。CZ01 钻孔风化壳厚度 6.8 m, 矿床厚度为 5.2 m, 稀土品位为含 REO 在 0.76% ~ 0.96%; CZ02 钻孔风化壳厚度 17.0 m, 矿床厚度为 16.5 m, 稀土品位为含 REO 在 0.70% ~ 2.49%; CZ04 钻孔风化壳厚度 12.0 m, 矿床厚度为 6.6 m, 稀土品位为含 REO 在 0.49% ~ 1.22%; CZ07 钻孔风化壳厚度 7.8 m, 矿床厚度为 7.8 m, 稀土品位为含 REO 在 0.88% ~ 1.21%。从钻孔施工情况来看, 矿床的纵向品位总体具有上贫、中富、下贫的规律, 风化壳强风化层的稀土品位高于全风化层、中风化层的稀土品位, CZ01、CZ04、CZ07 钻孔品位变化不大, 具“直线式”分布特征, 而 CZ02 钻孔品位变化较大, 则表现出明显的“波浪式”特征。矿床的横向上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则越高, 相应的矿体品位及厚度均富而厚, 特别是强风化层的厚度越大, 矿体的厚度也更大, 品位也相对较高, 龙井山矿区矿体厚度、品位与风化壳厚度呈正相关关系。

4 成矿作用分析

龙井山安山岩离子吸附型稀土矿床, 其形成具有“内生外成”的特征, 主要表现为受母岩、地貌、气候、地质构造等因素的控制。内生作用决定了母岩中的丰度, 从而在外生条件下稀土元素的进一步富集成矿奠定了物质基础。

表 1 腾冲龙井山安山岩的主量元素、微量元素和稀土元素分析结果
Table 1 Whole rock analyses of major elements, trace elements and rare earth elements of andesite from Longjingshan in the Tengchong area

Sample	BC-B1	BC-B2	BC-B3	BC-B4	BC-B5	BC-B6	BC-B7	BC-B8	BC-B9
主量元素/%									
SiO ₂	64.39	65.37	64.99	64.52	64.98	64.73	64.86	63.92	65.23
TiO ₂	1.00	0.95	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.92	0.96
Al ₂ O ₃	15.96	15.37	15.79	15.45	15.29	15.46	15.35	15.13	15.42
Fe ₂ O ₃	5.29	5.01	5.06	5.04	4.85	4.71	4.68	4.76	5.02
MnO	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06
MgO	1.07	1.32	1.20	1.58	1.80	1.79	1.79	1.77	1.22
CaO	2.44	3.33	3.13	3.11	3.71	3.73	3.74	3.76	3.21
Na ₂ O	3.01	3.37	3.28	3.26	3.40	3.31	3.24	3.35	3.37
K ₂ O	4.41	4.44	4.16	4.29	4.20	4.20	4.20	4.29	4.27
P ₂ O ₅	0.39	0.37	0.38	0.37	0.37	0.36	0.37	0.37	0.37
LOI	1.50	0.54	0.79	0.77	0.72	0.94	1.01	0.88	0.58
Total	99.51	100.13	99.79	99.39	100.35	100.25	100.26	99.23	99.71
微量元素/10 ⁻⁶									
Li	22.3	20.1	19.3	23.7	28.0	28.3	28.5	28.0	19.1
Be	3.64	4.60	5.22	3.39	3.01	3.24	3.16	3.12	4.90
Sc	9.94	9.72	9.69	9.88	9.62	9.67	9.86	9.33	9.39
V	72.9	70.7	71.0	74.0	71.1	68.6	70.1	69.2	70.3
Cr	25.9	23.3	23.6	24.2	23.0	23.0	23.2	22.9	22.8
Co	8.51	9.00	9.30	9.51	8.83	8.95	9.57	11.80	8.75
Ni	7.63	8.50	8.59	8.50	7.20	6.92	8.32	10.00	8.71
Cu	12.30	13.30	13.20	13.00	7.89	4.63	13.90	12.50	13.10
Zn	89.4	85.0	87.3	85.6	84.4	83.4	87.2	83.7	88.0
Ga	23.1	22.1	22.6	22.8	22.1	22.3	22.9	22.1	22.3
Rb	177	174	174	184	167	166	165	162	174
Sr	375	462	445	406	455	457	474	471	449
Y	33.8	43.9	44.4	69.4	31.2	31.9	32.6	31.3	48.4
Zr	429	401	417	429	408	419	436	370	407
Nb	29.7	28.1	28.7	28.8	28.1	27.8	28.5	27.2	28.7
Sn	3.21	2.86	2.46	3.11	2.94	3.11	3.19	2.99	2.71
Cs	1.65	1.74	1.77	3.30	1.94	1.90	1.93	1.88	1.79
Ba	1435	1187	1332	1128	1076	1073	1095	1065	1195
La	111	120	123	130	109	109	112	108	129
Ce	223	216	228	257	226	226	232	222	229
Pr	22.5	23.9	24.9	27.2	21.8	21.9	22.5	21.7	25.8
Nd	78.3	82.7	86.4	95.8	75.0	75.7	77.8	74.9	91.1
Sm	11.7	13.0	13.7	15.0	11.4	11.4	11.8	11.2	14.0
Eu	1.91	2.13	2.13	3.27	1.93	1.89	1.99	1.94	2.19
Gd	7.98	9.45	9.24	11.60	8.02	7.94	8.20	8.00	10.30
Tb	1.09	1.23	1.24	1.49	1.03	1.02	1.02	1.02	1.34
Dy	6.05	7.01	7.34	8.91	5.84	5.71	5.95	5.53	7.51
Ho	1.08	1.28	1.29	1.73	1.01	1.05	1.07	1.01	1.37
Er	3.22	3.89	3.78	5.15	3.00	3.03	3.19	2.93	4.17
Tm	0.41	0.50	0.52	0.70	0.41	0.42	0.40	0.39	0.52
Yb	2.63	3.09	3.17	4.35	2.46	2.63	2.60	2.39	3.37
Lu	0.41	0.51	0.52	0.72	0.40	0.41	0.41	0.40	0.55
Hf	9.41	8.74	9.10	9.52	9.11	9.16	9.53	8.21	9.00
Ta	1.63	1.56	1.60	1.62	1.56	1.54	1.57	1.52	1.61
Tl	0.84	0.72	0.72	0.89	0.62	0.59	0.66	0.74	0.75
Pb	37.6	32.5	32.9	39.0	37.0	37.5	38.5	37.2	32.9
Th	42.3	40.6	40.4	41.1	39.8	39.9	40.8	38.9	40.8
U	3.89	3.75	3.80	3.86	3.81	3.71	3.73	3.60	3.84
La/Nb	3.74	4.28	4.28	4.53	3.86	3.91	3.93	3.98	4.50
Nb/La	0.27	0.23	0.23	0.22	0.26	0.26	0.25	0.25	0.22
Nb/U	7.63	7.48	7.55	7.46	7.38	7.49	7.63	7.55	7.48
Zr/Y	12.69	9.13	9.38	6.18	13.09	13.14	13.39	11.86	8.41
(La/Yb) _N	11.94	12.13	11.80	11.96	11.89	12.03	12.01	12.00	11.91
∑REE	505	529	550	632	498	499	514	493	569
∑LREE	482	502	523	598	475	477	491	471	539
∑HREE	23	27	27	35	22	22	23	22	29

表 2 腾冲龙井山钻孔风化壳稀土元素分析结果/ 10^{-6}

Table 2 Analytical results / 10^{-6} of rare earth elements in weathered crust from Longjingshan boreholes, Tengchong

Sample	CZ01-ZH1	CZ04-ZH1	CZ05-ZH1	CZ05-ZH2	CZ07-ZH1	CZ07-ZH2
La	198	257	183	216	224	472
Ce	314	370	304	330	354	368
Pr	30.9	38.4	27.8	33.1	34.6	67.6
Nd	80.5	93.9	71.8	83.9	84.9	170.0
Sm	16.2	19.3	14.8	18.0	18.8	28.4
Eu	2.64	3.31	2.54	3.08	3.36	4.36
Gd	14.0	15.0	12.6	15.2	15.9	20.4
Tb	1.82	1.90	1.60	1.92	2.04	2.39
Dy	8.92	8.38	7.60	9.56	11.20	10.70
Ho	1.72	1.46	1.36	1.75	2.66	1.91
Er	4.72	3.64	3.38	4.48	7.88	5.04
Tm	0.86	0.55	0.54	0.70	1.50	0.75
Yb	5.09	3.04	3.06	3.94	9.14	4.04
Lu	0.84	0.41	0.45	0.54	1.43	0.60
Y	50.7	30.5	30.5	42.9	89.6	48.4
Σ REE	731	847	665	765	861	1205
Σ LREE	693	812	634	727	809	1159
Σ HREE	30.8	34.4	30.6	38.1	51.8	45.8

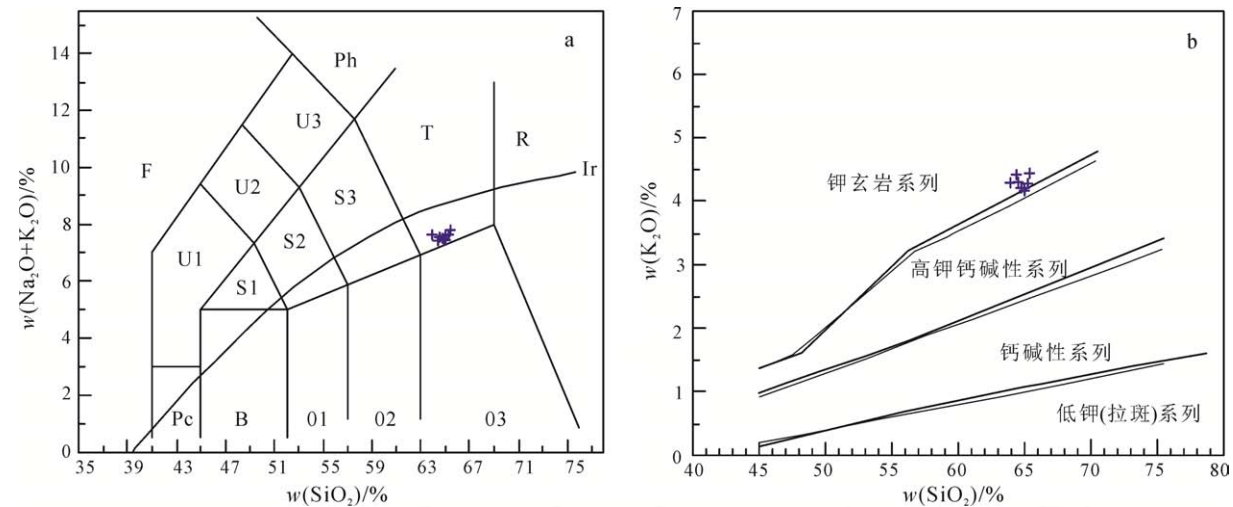


图 3 龙井山安山岩硅碱(TAS)图(a)和 SiO_2 - K_2O 图(b)

Fig. 3 TAS (a) and SiO_2 - K_2O (b) diagrams of andesite in Longjingshan

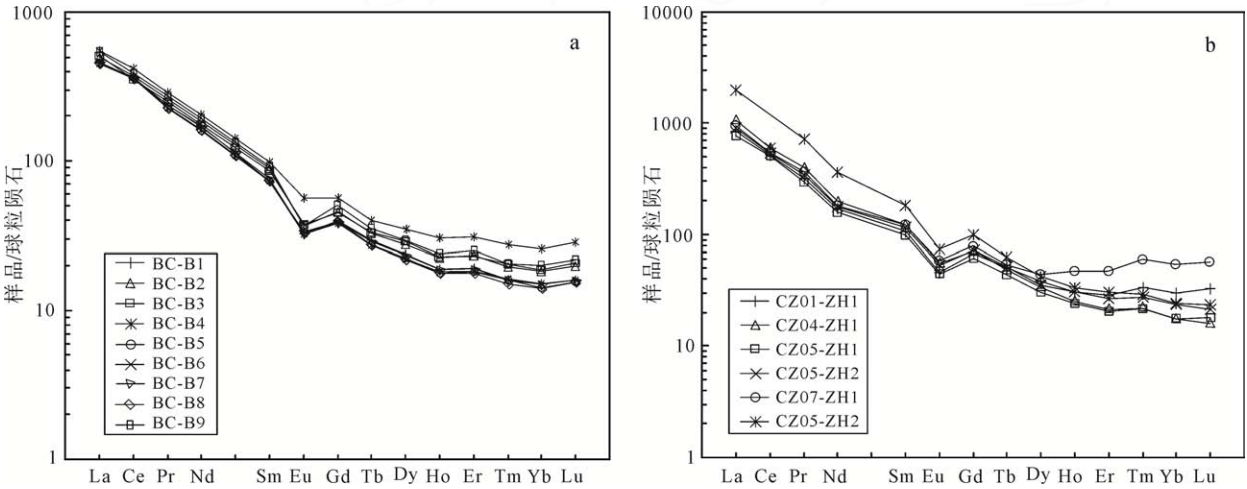


图 4 研究区稀土元素球粒陨石标准化模式图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns

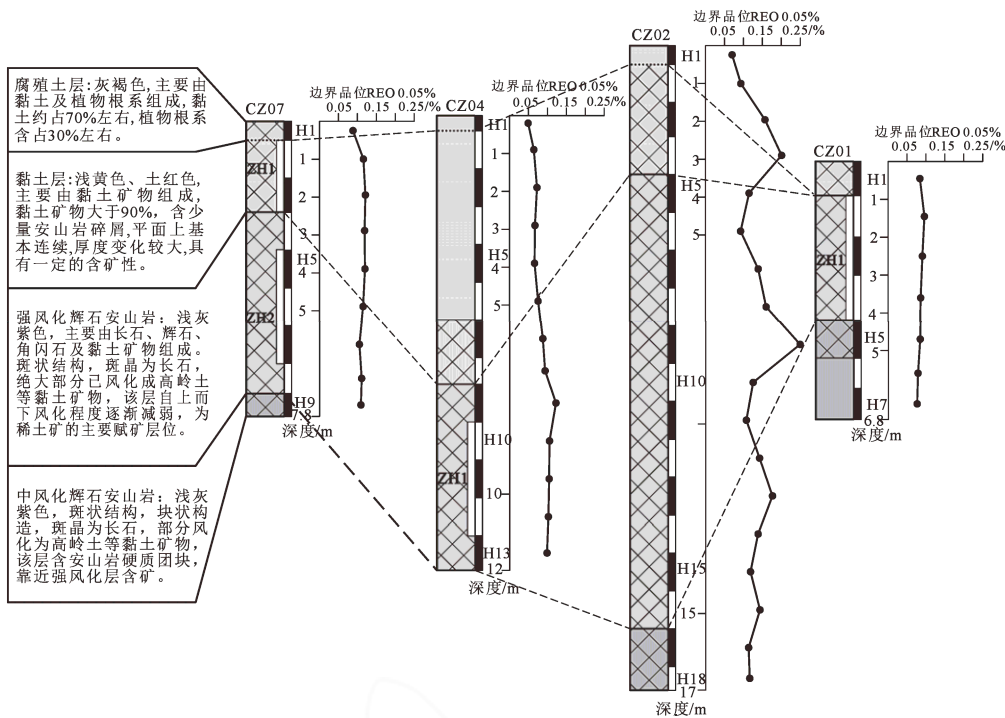


图 5 龙井山稀土矿区钻孔中的稀土总量变化趋势
Fig. 5 Variation of total REE at drillholes in Longjingshan REE deposit district

表 3 滇西龙井山稀土矿区浅钻取样的稀土总量
Table 3 Total REE from drill holes in the Longjingshan REE ore deposit in western Yunnan

钻孔编号	取样号	稀土总量/%	钻孔编号	取样号	稀土总量/%
CZ01	H1	0.84	CZ04	H1	0.49
	H2	0.96		H2	0.64
	H3	0.91		H3	0.72
	H4	0.86		H4	0.67
	H5	0.84		H5	0.66
	H6	0.78		H6	0.75
	H7	0.76		H7	0.87
CZ02	H1	0.70		H8	0.93
	H2	0.93		H9	1.22
	H3	1.57		H10	1.05
	H4	2.01		H11	1.04
	H5	1.15		H12	1.02
	H6	0.93		H13	0.98
	H7	1.39	CZ07	H1	0.88
	H8	1.60		H2	1.16
	H9	2.49		H3	1.21
	H10	1.25		H4	1.19
	H11	1.07		H5	1.20
	H12	1.42		H6	1.15
	H13	1.76		H7	1.05
	H14	1.38		H8	1.11
	H15	1.18		H9	1.09
	H16	1.43			
	H17	1.13			
	H18	1.16			

4.1 成矿物质来源

腾冲火山岩中的新近纪火山岩含矿建造，主要由灰紫色气孔状辉石安山岩、辉石玻基安山岩等中基性熔岩组成。一般认为，形成离子吸附型稀土矿床的母岩需要具有较高的稀土丰度，本区辉石安山

岩的ΣREE 均值为 532×10⁻⁶，远大于腾冲地区花岗岩的ΣREE 均值为 262×10⁻⁶，具备形成离子吸附型稀土矿的先决条件，为稀土矿化提供了必须的物质来源，在以化学作用为主导的表生作用下，原岩岩石、矿物遭受不同程度的分解(王阳平和赵鹏坤，

2016), 化学成分发生了显著的变化, SiO_2 、 MgO 等不断淋失减少, REE 呈离子态不断的迁移富集, 黏土矿物逐渐增加形成松散状的风化壳, 稀土元素随着表生作用的进行和岩石矿物的进一步分解, 呈离子状态发生迁移, 而黏土矿物具有较强的吸附性, 使得稀土元素在风化壳中发生次生富集而形成稀土矿工业矿体。

4.2 地形地貌

地形地貌决定着风化壳的发育厚度, 风化壳的发育是形成离子吸附型稀土矿床的重要先决条件之一, 它形成了保留 REE 富集成矿的基本场所。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高度小于 550 m、相对高差 60~250 m 的丘陵地带, 一般陡坡地形、“V”型山谷、尖棱形山顶(脊)不利于离子吸附型稀土矿的形成, 但研究区龙井山稀土矿床 CZ02 钻孔海拔高度达 1935 m, 与我国东部地区不同。研究区海拔标高 1780~1935 m 不等, 相对切割深度 30~100 m, 成矿母岩风化产物在地形坡度小于 30° 的缓坡地带, 宽阔山顶、缓倾山脊等有利地段堆积保存, 形成面型风化壳, 有利于稀土元素的富集, 而形成稀土矿体; 沟谷地带或陡坡地段风化壳厚度较小, 不具备稀土元素的富集保存条件, 稀土矿体较薄或不发育。风化壳厚度决定了风化程度的深浅, 风化壳厚度越大, 风化程度就越高, 相应矿化品位及矿体厚度均富而厚, 从龙井山研究区风化壳稀土氧化物总量 REE 垂向变化图(图 5)上可以看出: 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, 相应而言矿体品位也有类似的正相关关系。从钻孔施工情况来看, 研究区风化壳厚度与地形坡度密切相关(图 2), 宽阔山顶处的 CZ02 钻孔揭露风化壳厚度 17.0 m, 稀土矿体厚度 16.5 m; 缓倾山脊处的 CZ04 钻孔揭露风化壳厚度 12.0 m, 稀土矿体厚度 6.6 m; 陡坡上的 CZ01 钻孔揭露风化壳厚度 6.8 m, 稀土矿体厚度 5.2 m; CZ04 钻孔与 CZ07 钻孔之间的沟谷处, 见中风化岩石出露, 不发育稀土矿体。

4.3 气候

研究区属热带季风气候, 温暖潮湿, 雨量充沛, 有利于化学风化作用的不断进行, 加速了含矿母岩的解体, 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, 同时长石类矿物的高岭土化, 具有高原子量、高原子价的稀土离子被高岭土等黏土矿物吸附、固定, 从而使稀土元素次生富集以至形成矿床。

5 结论

(1)研究区中基性火山岩离子吸附型稀土矿床为富铈轻稀土矿床, 矿体主要赋存于新近纪辉石安山岩风化壳的强风化层中, 少量产于靠近辉石安山岩强风化层的全风化层或中风化层中, 矿体受地形坡度控制明显, 平缓山头、宽缓的山脊处矿体厚度大品位高, 沟谷或陡坡处厚度薄品位低。

(2)研究区形成离子吸附型稀土矿床首先母岩需要具有较高的稀土丰度, 然后在温湿多雨的环境下加速了岩石的风化解离, 稀土元素不断迁移, 最终在地势较为宽缓平坦处形成风化壳而保留下来, 次生富集形成稀土矿床。

(3)研究区中基性火山岩离子吸附型稀土矿为云南轻稀土矿床的新类型, 该矿床的发现具有区域找矿指导意义, 在云南地区的火山岩风化壳中可能发现新的风化壳离子吸附型稀土矿。

致谢: 感谢审稿专家提出的宝贵意见, 感谢中国地质调查局成都地质调查中心提供的项目支持, 感谢中国冶金地质总局昆明地质勘查院同事们在野外地质调研中的帮助!

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20179604).

参考文献:

- 丛峰, 林仕良, 谢韬, 李再会, 邹光富, 梁婷. 2010. 滇西腾冲—梁河地区花岗岩锆石稀土元素组成和 U-Pb 同位素年龄[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(3): 573-580.
- 李建忠, 陆生林, 吴文贤, 丁俊, 王保弟, 赵作新, 崔子良. 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[J]. 中国地质调查, 4(2): 9-21.
- 林木森, 彭松柏, 乔卫涛, 李辉. 2014. 腾冲地块高地热异常区晚白垩世-始新世钾玄质强过铝花岗岩岩石地球化学、年代学特征及构造意义[J]. 岩石学报, 30(2): 527-546.
- 林木森, 彭松柏, 乔卫涛. 2017. 滇西腾冲更新世粗面安山岩 Ar-Ar 年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 33(10): 3137-3146.
- 刘殿蕊. 2020. 云南宣威地区峨眉山玄武岩风化壳中发现铈、稀土矿[J]. 中国地质, 47(2): 540-541.
- 陆蕾, 王登红, 王成辉, 赵芝, 冯文杰, 徐晓春, 陈晨, 钟海仁. 2020. 云南离子吸附型稀土矿成矿规律[J]. 地质学报, 94(1): 179-191.
- 戚学祥, 朱路华, 胡兆初, 李志群. 2011. 青藏高原东南缘腾冲早白垩世岩浆岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素组成及其构造意义[J]. 岩石学报, 27(11): 3409-3421.
- 万鑫, 杨一增, 李双庆, 陈福坤. 2018. 滇西腾冲地块勐连花岗岩及暗色包体锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征[J]. 地球科学与环境学报, 40(5): 563-581.
- 王阳平, 赵鹏坤. 2016. 江西省古溪地区新型稀土矿找矿远景分

析[J]. 中国高新技术企业, (30): 152-153.

谢韬, 林仕良, 丛峰, 李再会, 邹光富, 李军敏, 梁婷. 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[J]. 大地构造与成矿学, 34(3): 419-428.

杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 罗震宇, 石玉若. 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[J]. 岩石学报, 25(5): 1092-1104.

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

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.

张彬, 马国桃, 高儒东, 曾招金, 汪亮, 左正龙, 黄帅科. 2018. 滇西腾冲-梁河地区土官寨离子吸附型稀土矿床形成条件及找矿预测[J]. 地球科学, 43(8): 2628-2637.

周淑敏, 王庆飞, 李龚健. 2018. 滇西腾冲地块梁河晚三叠世正长花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 34(5): 1359-1375.

邹光富, 林仕良, 李再会, 丛峰, 谢韬. 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[J]. 大地构造与成矿学, 35(3): 439-451.

References:

CONG Feng, LIN Shi-liang, XIE Tao, LI Zai-hui, ZOU Guang-fu, LIANG Ting. 2010. Rare earth element geochemistry and U-Pb age of zircons from granites in Tengchong-Lianghe area, Western Yunnan[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 40(3): 573-580(in Chinese with English abstract).

LI Jian-zhong, LU Sheng-lin, WU Wen-xian, DING Jun, WANG Bao-di, ZHAO Zuo-xin, CUI Zi-liang. 2017. New cognition and discovery of rare earth deposits in the Xiaolonghe tin-REE polymetallic orefield of Tengchong in Yunnan Province[J]. Geological Survey of China, 4(2): 9-21(in Chinese with English abstract).

LIN Mu-sen, PENG Song-bai, QIAO Wei-tao, LI Hui. 2014. Petro-geochemistry and geochronology of late Cretaceous-Eocene granites in high geothermal anomaly areas in the Tengchong block, Yunnan Province, China and their tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(2): 527-546(in Chinese with English abstract).

LIN Mu-sen, PENG Song-bai, QIAO Wei-tao. 2017. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and geochemistry of Pleistocene trachyandesite in Tengchong, western Yunnan, China, and its tectonic implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(10): 3137-3146(in Chinese with English abstract).

LIU Dian-rui. 2020. Nb and REE deposits found in the weathering crusts of Emeishan basalt, Xuanwei area, Yunnan Province[J]. Geology in China, 47(2): 540-541(in Chinese).

LU Lei, WANG Deng-hong, WANG Cheng-hui, ZHAO Zhi, FENG Wen-jie, XU Xiao-chun, CHEN Chen, ZHONG Hai-ren. 2020. The metallogenic regularity of ion-adsorption type REE deposit in Yunnan Province[J]. Acta Geologica Sinica, 94(1):

179-191(in Chinese with English abstract).

QI Xue-xiang, ZHU Lu-hua, HU Zhao-chu, LI Zhi-qun. 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating and Lu-Hf isotopic composition for Early Cretaceous plutonic rocks in Tengchong block, southeastern Tibet, and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(11): 3409-3421(in Chinese with English abstract).

WAN Xin, YANG Yi-zeng, LI Shuang-qing, CHEN Fu-kun. 2018. Zircon U-Pb ages, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotope characteristics of Menglian granites and their dark enclaves in Tengchong block of western Yunnan, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 40(5): 563-581(in Chinese with English abstract).

WANG Yang-ping, ZHAO Peng-kun. 2016. Prospect analysis of new rare earth deposits in Guxi area, Jiangxi Province[J]. China High-Tech Enterprises, (30): 152-153(in Chinese).

XIE Tao, LIN Shi-liang, CONG Feng, LI Zai-hui, ZOU Guang-fu, LI Jun-min, LIANG Ting. 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for K-feldspar granites in Lianghe region, western Yunnan and its geological significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 34(3): 419-428(in Chinese with English abstract).

YANG Qi-jun, XU Yi-gang, HUANG Xiao-long, LUO Zhen-yu, SHI Yu-ruo. 2009. Geochronology and geochemistry of granites in the Tengliang area, western Yunnan: Tectonic implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(5): 1092-1104(in Chinese with English abstract).

ZENG Kai, LI Lang-tian, ZHU Xiang-ping, XIA Bin. 2019. The metallogenic regularity and prospecting potential of rare-earth deposits of ion-adsorbent type in the Mengwang-Manmai area, western Yunnan[J]. Geology and Exploration, 55(1): 19-29(in Chinese with English abstract).

ZHANG Bao-tao, LAN Xin-jie, JIN Gang, LI Xing-liang, ZHANG Yong-san, HU Zhao-guo, SUN Lu-wei, WANG Xiang-wei, ZHANG Xiu-long, GUO Wei. 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 Bin, MA Guo-tao, GAO Ru-dong, ZENG Zhao-jin, WANG Liang, ZUO Zheng-long, HUANG Shuai-ke. 2018. Formation conditions and prospecting prediction of Tuguanzhai ion-adsorption type REE deposit in Tengchong-Lianghe area[J]. Earth Science, 43(8): 2628-2637 (in Chinese with English abstract).

ZHOU Shu-min, WANG Qing-fei, LI Gong-jian. 2018. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology from the Late Triassic syenogranite in Lianghe area, Tengchong block, and their geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(5): 1359-1375(in Chinese with English abstract).

ZOU Guang-fu, LIN Shi-liang, LI Zai-hui, CONG Feng, XIE Tao. 2011. Geochronology and geochemistry of the Longtang granite in the Lianghe area, western Yunnan and its tectonic implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 35(3): 439-451 (in Chinese with English abstract).