

广东韶关红岭黑云母花岗岩和离子吸附型 稀土矿床地球化学特征

郭敏¹, 黄玲玲¹, 孙社良¹, 黄孔文¹, 贺强翔¹, 向安平²

1. 广东省地质调查院, 广州 510080;

2. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 成都 611230

[摘要] 离子吸附型稀土矿产是中国优势资源, 对其开展深入的研究, 有助于提升中国关键金属资源的安全保障程度。对广东韶关红岭地区新发现的离子吸附型稀土矿床的钻孔中的风化壳剖面 and 深部的新鲜黑云母花岗岩开展了全岩主量元素、微量稀土元素和锆石 U-Pb 年代学分析, 旨在查明成矿母岩的地球化学特征和稀土元素在风化壳中的富集特征。新鲜花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(162.0 \pm 0.5) \text{Ma}$ 。红岭花岗岩的 SiO_2 (平均值为 73.73%)、 Al_2O_3 、 K_2O 质量分数和 A/CNK 值均较高(平均值为 1.2), 属于钙碱性岩浆岩; 结合微量元素特征, 红岭岩体起源于下地壳变沉积岩部分熔融形成的 S 型花岗岩。红岭花岗岩稀土元素总量较高(平均值为 225.3×10^{-6}), 是形成离子吸附型稀土矿的优质物源。从表土层、全风化层到半风化层, 稀土元素质量分数由小到大再变小。风化层的稀土元素质量分数整体较高, 平均值为 608.9×10^{-6} ; 轻/重稀土元素比值平均为 5.5, 属于轻稀土元素富集型。风化层中的稀土元素继承了深部花岗岩的地球化学特征。花岗岩的稀土元素质量分数较高, 并且风化层中高的化学蚀变指数表明研究区具有较好的离子吸附型稀土矿的找矿潜力。

[关键词] 黑云母花岗岩; 离子吸附型稀土矿; 岩石成因; 南岭; 广东韶关

[分类号] P595

[文献标志码] A

Geochemical characteristics of Hongling biotite granite and ion-adsorbed rare earth deposits in Shaoguan, Guangdong

GUO Min¹, HUANG Linlin¹, SUN Sheliang¹, HUANG Kongwen¹,
HE Qiangxiang¹, XIANG Anping²

1. Guangdong Geological Survey Institute, Guangzhou 510080, China;

2. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 611230, China

[收稿日期] 2023-09-30。

[基金项目] 广东省地质勘查与城市地质专项项目广东省稀土资源调查评价(2022-14); 国家自然科学基金项目(41802095)。

[第一作者] 郭敏(1982—), 男, 正高级工程师, 研究方向: 三稀矿产资源勘查与评价, E-mail: guominddy@qq.com。

[通信作者] 向安平(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向: 矿产资源勘查与评价, E-mail: 136095387@qq.com。

[引用格式] 郭敏, 黄玲玲, 孙社良, 等, 2024. 广东韶关红岭黑云母花岗岩和离子吸附型稀土矿床地球化学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(4): 561-578+595.

Guo M, Huang L L, Sun S L, et al., 2024. Geochemical characteristics of Hongling biotite granite and ion-adsorbed rare earth deposits in Shaoguan, Guangdong[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4): 561-578+595.

Abstract: China is rich in ion-adsorbed rare earth deposits and their extensive study can help secure key metal resources for the country. In this study, we analyze the weathered crust section of the newly discovered ion-adsorbed rare earth deposit in the Hongling area of Shaoguan, in the Guangdong Province of China, and examine the fresh granite, trace elements, and zircon U-Pb chronology of the whole-rock major elements. The aim is to identify the geochemical characteristics of the ore-forming bedrock and the mechanism of enrichment of rare earth elements in the weathered crust. The zircon U-Pb age of Hongling biotite monzonite was (162.0 ± 0.5) Ma, which is consistent with the metallogenic age of tungsten-tin rare metals in the Nanling area. The Hongling granite had high contents of SiO_2 (average, 73.73%), Al_2O_3 , K_2O , and A/CNK (average, 1.2), and was classified as calc-alkaline magmatic rock. This, combined with the characteristics of the trace elements, led us to determine that the Hongling pluton had originated from S-type granite formed by the partial melting of metasedimentary rocks in the lower crust. The Hongling granite also had a high content of rare earth elements (average, 225.3×10^{-6}), which constitute a high-quality source for the formation of ion-adsorbed rare earth minerals. The content of rare earth elements increased from low to high, and then decreased from the topsoil layer, the upper part of the total regolith, and the lower part of the regolith to the semi-regolith. The content of rare earth elements in the regolith was relatively high on the whole, with an average value of 608.9×10^{-6} . The average ratio of light to heavy rare earth elements was 5.5, and they were classified as enriched and light rare earth elements. The rare earth elements in the regolith of the Hongling area had inherited the geochemical characteristics of fresh Hongling granite. The latter had a high content of rare earth elements, while the high chemical alteration index of the regolith suggests that the study area had good ore-prospecting potential for ion-adsorbed rare earth deposits.

Key words: biotite granite; ion-adsorbed rare earth element deposits; petrogenesis; Nanling; Shaoguan, Guangdong Province

稀土矿床主要分为内生型和外生型,内生型以碳酸岩型、碱性岩型和热液型为主,外生型以风化壳型和沉积型为主(范宏瑞等,2020)。外生的风化壳离子吸附型矿床的稀土元素主要以离子相态形式吸附于风化壳的黏土矿物中(姚玉玲等,2022;李超等,2023),其成矿特征主要受控于成矿母岩中富稀土元素副矿物(氟碳铈矿、磷灰石、磷钇矿、独居石、褐帘石和榍石等)的地球化学特征(周美夫等,2020)。离子吸附型稀土矿床提供了全世界超过90%的重稀土元素,且具有元素配分全、易开采和回收率高等优点(梁晓亮等,2022),是稀土矿床中重要的一类矿床。富集重稀土的离子吸附型矿的原岩一般为高分异的过铝质-偏铝质花岗岩类,岩石类型以黑云母花岗岩、二云母花岗岩及少量白云母花岗岩为主,富集轻稀土的离子吸附型矿的原岩主要

为变质岩和分异程度低的流纹岩和花岗岩类(毛景文等,2022)。

中国拥有较为丰富的稀土资源,稀土是中国具有优势的战略性关键金属矿产资源。尽管中国稀土资源储量占世界总储量的37%,但是,中国的稀土年产量和供给却占全球的80%以上(张苏江等,2020)。这将导致中国稀土资源储量的锐减,并威胁中国在稀土资源方面的优势地位,影响国家资源安全保障(李文昌等,2022)。因此,加强稀土资源的勘查力度、清洁利用和成因研究迫在眉睫(王登红等,2013)。

中国的离子吸附型稀土矿床主要分布于华南地区(Chu et al.,2023)。前人对南岭地区的离子吸附型稀土矿床开展了详细的研究(吴澄宇等,1989),基本查明了其成矿母岩特征、元素迁移形式、稀土元素富集和吸附机制、并提出了成矿和找

矿模型(Li et al., 2017)。近年来,南岭地区的离子吸附型稀土矿床的找矿勘查取得了较好的成果,比如江西南部 and 广西东部(Chu et al., 2023)(图1)。与赣南的足洞、关西、寨背和龙南等矿床处于同一条花岗岩带上的粤北的贵东—热水岩体一带也有较好的找矿发现(赵芝等, 2014),但是其研究程度较低,这制约了区域找矿勘查进展。本

次研究对广东韶关红岭地区新发现的离子吸附型稀土矿床的钻孔中的风化壳剖面 and 深部的新鲜花岗岩开展全岩主量元素、微量稀土元素和锆石 U-Pb 年代学分析,旨在查明成矿母岩的地球化学特征和稀土元素在风化壳中的富集机制。本次研究将有助于粤北地区离子吸附型稀土矿床的成因研究并指导区域找矿勘查。

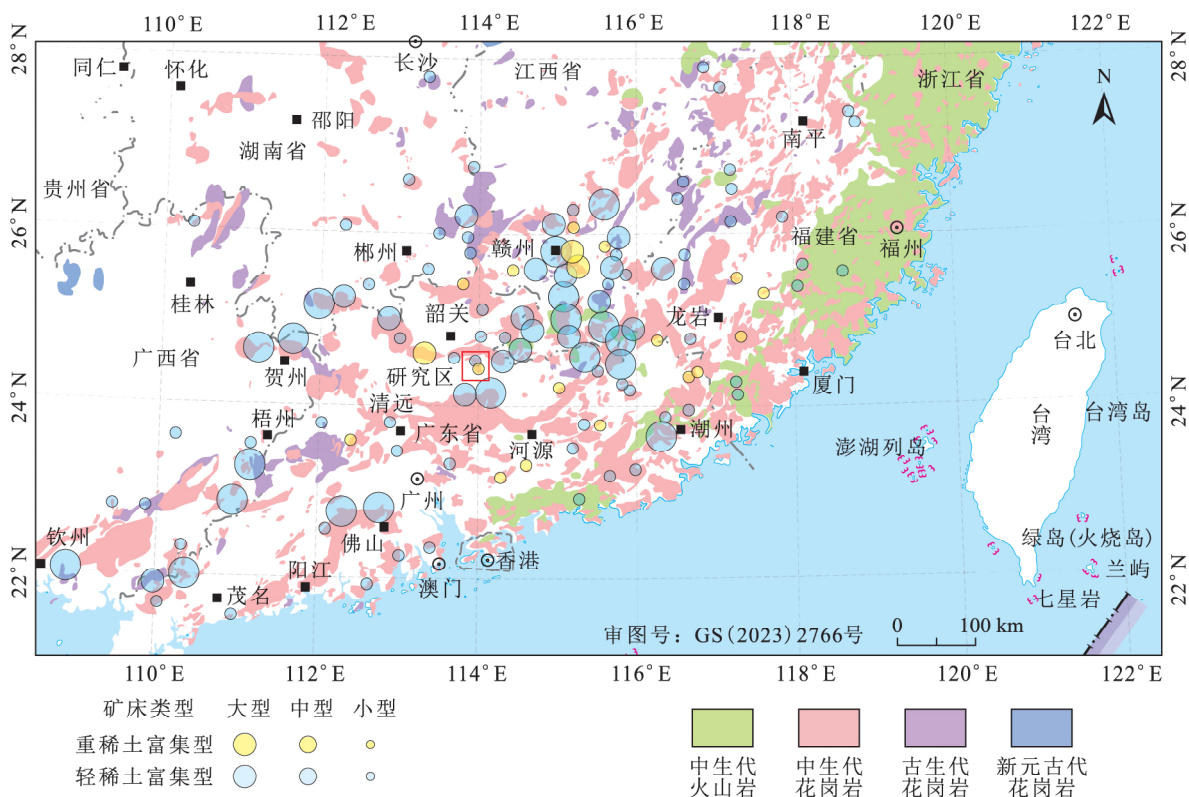


图1 华南地区花岗岩和离子吸附型稀土矿产分布图(底图据 Li et al., 2017 修改)

Fig. 1 The types of ions adsorbed by granite and the distribution of rare earth minerals in south China

1 区域地质背景

华南板块由扬子克拉通和华夏地块在新元古代 830~810 Ma 拼合而成(徐先兵等, 20 21)。南岭地区构造位置主要包括扬子地块的东部、江南造山带以及华夏地块的西部,地理位置上主要位于桂东、湘南、赣南和粤北(吴福元等, 2023)。南岭地区主要由 3 条近东西向的花岗岩带(北侧的骑田岭—九峰山、中部的大东山—贵东山和南部的佛冈—新丰江)组成(周新民, 2007)。南岭花岗岩主要包括前寒武纪(晋宁期)、早古生代(加里东期)、晚古生代(海西期)、早中生代(印支期)和晚中生代(燕山期)(孙涛, 2006)。燕山期是南岭地

区花岗岩的主要形成时期,可以细分为燕山早期(侏罗纪)和燕山晚期(白垩纪),其花岗岩的面积占比分别约 37%~58%和 15%~30%(吴福元等, 2023)。古生代时期的花岗岩主要受古特提斯洋演化的影响,晚古生代末期华南陆块分别与南侧的印支和北侧的华北陆块发生碰撞形成了基本的地质格架,而从中生代开始,华南地区的构造演化主要受太平洋板块的西向俯冲的控制(毛建仁等, 2014; 陈琿等, 2023)。

南岭地区广义的花岗质岩的岩石类型主要包括花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩和碱长花岗岩,尤其以二长花岗岩和正长花岗岩最丰富。花岗岩中的暗色矿物(角闪石和黑云母)较低,而

富含白云母、石榴石和电气石等指示高演化和过铝质的矿物。南岭地区几乎各个时代的花岗岩都与成矿有关(陈骏等,2014),比如新元古代的广西罗城宝坛锡矿,834 Ma(Zhang et al.,2019),志留纪的湘西南落家冲钨锡矿,433 Ma(陈剑锋等,2023),三叠纪的桂北栗木钨锡铌钽矿,214~203 Ma(Huang et al.,2020),侏罗纪的湘东邓阜仙铌钽钨锡矿,158~153 Ma(毛禹杰等,2021),白垩纪的湘南界牌岭锡多金属矿,92~90 Ma(Yuan et al.,2015)。与上述燕山期花岗岩分布最广泛相对应的是,南岭地区主要的钨锡稀有金属成矿时代为侏罗纪(汪相和楼法生,2022)。

南岭地区以发育岩浆热液内生型钨锡铌钽稀有金属矿著称(王岩等,2023),与此同时,由于南岭地区以亚热带季风气候为主,高温多雨(陈琿等,2022;奉大博等,2022),导致形成著名的外生离子吸附型稀土矿区(吴澄宇等,1989)。南岭离子吸附型稀土矿床包括富集重稀土型(比如足洞和大田)、富集轻稀土型(比如关西和姑婆山)和轻重稀土共生过渡类型(比如寨背和清溪)(付伟等,2022)。稀土矿床的类型主要与成矿母岩的稀土

元素地球化学和载体矿物属性密切相关(黄玉凤等,2022)。华南目前查明的重要的离子吸附型稀土矿床主要产于燕山期花岗岩的风化壳中,严格受富稀土元素的花岗岩的分布范围的控制(周美夫等,2020)。

2 样品采集与分析方法

本次研究区位于南岭中带的大东山—贵东山花岗岩带的热水—红岭岩体(邓平等,2011)(图2)。红岭中细粒斑状黑云母花岗岩具有似斑状结构和块状构造。斑晶主要为红色钾长石,粒径长度为1~3 cm,少量为白色的斜长石和石英斑晶。黑云母和白云母粒度较细,部分粒径约0.1~0.3 cm。新鲜花岗岩主要矿物成分为钾长石、斜长石和石英,其次为黑云母、白云母、锆石、独居石和磷灰石等(图3)。红岭地区风化壳剖面从上往下分为表土层、全风化层和半风化层。表土层为红褐色,主要由黏土矿物和石英颗粒组成;全风化层为浅红色和灰白色,主要由黏土矿物、石英和长石组成;半风化层呈现棕灰色,裂隙发育,主要由原生花岗岩岩块组成。

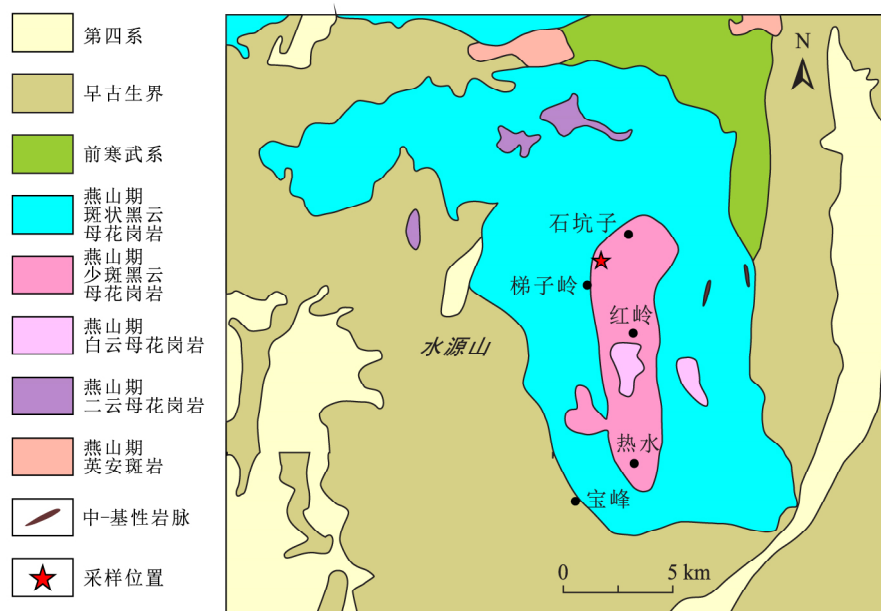


图2 红岭地区花岗岩地质简图和采样位置(底图据王小飞等,2010修改)

Fig.2 Geological sketch of and locations of sampling in the Hongling area

本次研究在广东省韶关市翁源县蒲竹镇北(113°57'22.5"E;24°29'41.2"N)采集新鲜黑云母花岗岩基岩样品1件做锆石U-Pb年代学分析,9件花岗岩做全岩主量元素和稀土微量元素分

析。地表垂向风化剖面上第0~2 m为表土层,2~22 m为全风化层,22~28 m为半风化层。每2 m取一个样品,其中表土层样品1件,全风化层样品10件,半风化层样品3件,共14件风化壳样

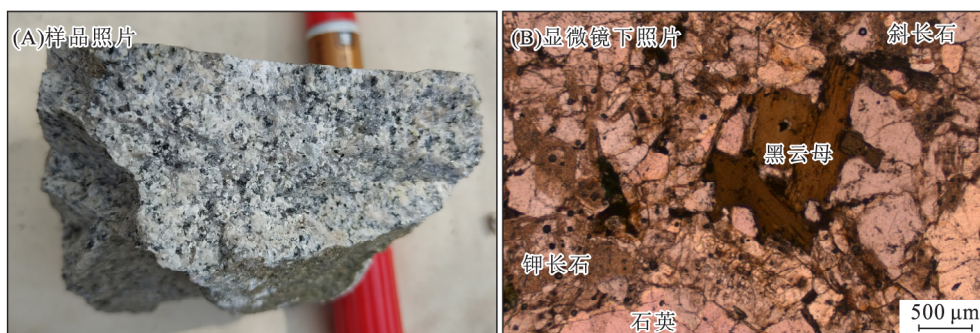


图3 红岭黑云母花岗岩样品及显微镜下照片

Fig. 3 Photograph of the sample and microscopic photograph of Hongling biotite monzogranite

品做全岩主量元素和稀土微量元素分析。

锆石 U-Pb 年代学和全岩主微量元素分析都在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石 U-Pb 同位素定年利用激光剥蚀等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 完成。激光剥蚀系统由 COM-PexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 Micro-Las 光学系统组成。锆石 U-Pb 测试的 ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气和氮气为补偿气以提高仪器灵敏度。锆石 U-Pb 分析的激光束斑和频率分别为 $32\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \text{Hz}$ 。分析采用 91500 (锆石标准) 和 NIST610 (玻璃标准) 作外标分别进行 U-Pb 同位素和微量元素校正。GJ-1 和 PLE 样品作为 U-Pb 同位素测年的监控样。分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal 完成。同位素计算和绘图采用 IsoplotR 完成。全岩粉末主量元素质量分数利用日本理学 Primus II 型 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 分析完成。取 200 目样品依次进行烘干、灼烧、熔融、冷却和测试。全岩微量元素利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成。全岩主量和微量元素分析精度分别优于 1% 和 5%。本次测试的标样和监控样结果均与推荐值在误差范围内一致。

3 测试分析结果

3.1 花岗岩锆石 U-Pb 年代学

黑云母花岗岩的锆石大部分为长柱状,长轴约 $80\sim 250\ \mu\text{m}$,阴极发光 (CL) 图像上部分锆石具有明显的核-边结构。核部锆石为浑圆状,颜色较浅,为继承锆石。边部锆石颜色较深,呈灰黑色,环带结构明显,属于典型的岩浆锆石。本次研究在边部岩浆锆石进行 U-Pb 同位素测试 20 点

(表 1)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄与 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄谐和度较好,谐和度介于 $98.7\%\sim 99.99\%$ (图 4-A)。边部锆石的 Th 和 U 的质量分数都较高,其质量分数平均值分别为 482×10^{-6} 和 $2\ 956\times 10^{-6}$, Th/U 值较高 ($0.07\sim 0.73$),平均值为 0.35。结合锆石 CL 特征,本次测试点均为岩浆成因锆石,其年龄可以代表岩浆结晶年龄 (张林奎等, 2022)。本次研究的 20 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(162.0\pm 0.5)\text{Ma}$ (平均标准权重偏差 = 0.4) (图 4-B),形成于晚侏罗统早期。

3.2 花岗岩元素地球化学

本次研究系统采集红岭黑云母花岗岩新鲜样品 9 件,分析显示有较弱的风化蚀变,烧失量偏高,质量分数在 $0.8\%\sim 2.1\%$ 之间变化,9 个样品的烧失量平均值为 1.2% (表 2)。去除烧失量,主量元素质量分数归一到 100% 后的 SiO_2 质量分数变化范围为 $71.96\%\sim 75.28\%$,平均值为 73.73% 。 Al_2O_3 的质量分数较高,变化范围为 $13.59\%\sim 15.48\%$,平均值为 14.29% 。样品的 K_2O 的质量分数较高,而 Na_2O 的较低,两者的平均值分别为 5.56% 和 2.88% 。 Fe_2O_3 质量分数较高,变化范围为 $1.70\%\sim 2.66\%$,平均值为 2.12% 。由于其 K_2O 质量分数较高,因此其 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ 较高,介于 $7.18\%\sim 8.68\%$ 之间 (图 5-A),平均值为 7.82% 。红岭黑云母花岗岩的 A 值 ($\text{Al}-(\text{K}+\text{Na}+2\text{Ca})$) 和 B 值 ($\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Ti}$) 都较低,分别介于在 $23\sim 84$ 和 $7\sim 20$ 之间,尤其是参数 B 值较低,表明暗色矿物较少,呈现出强过铝质特征 (Cao et al., 2022)。同样的,红岭黑云母花岗岩的铝饱和指数较高,铝饱和指数 $\text{A}/\text{CNK}[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO})]$ 介于 $1.09\sim 1.39$ 之间 (平均值为 1.2), $\text{A}/\text{NK}[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+$

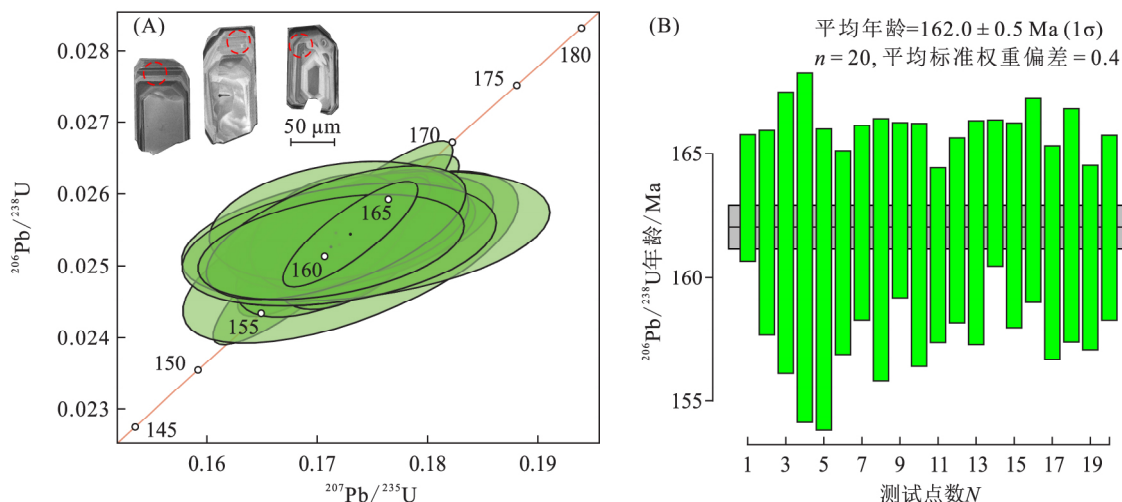


图 4 红岭黑云母花岗岩代表性锆石 CL 图像特征及 U-Pb 年龄谐和图和 U-Pb 坪年龄图
 Fig. 4 Representative characteristics of the CL image of zircon and the concordant figure of its U-Pb age, and U-Pb plateau age of Hongling biotite monzogranite
 (A) CL 图像特征和 U-Pb 年龄谐和图; (B) U-Pb 坪年龄图

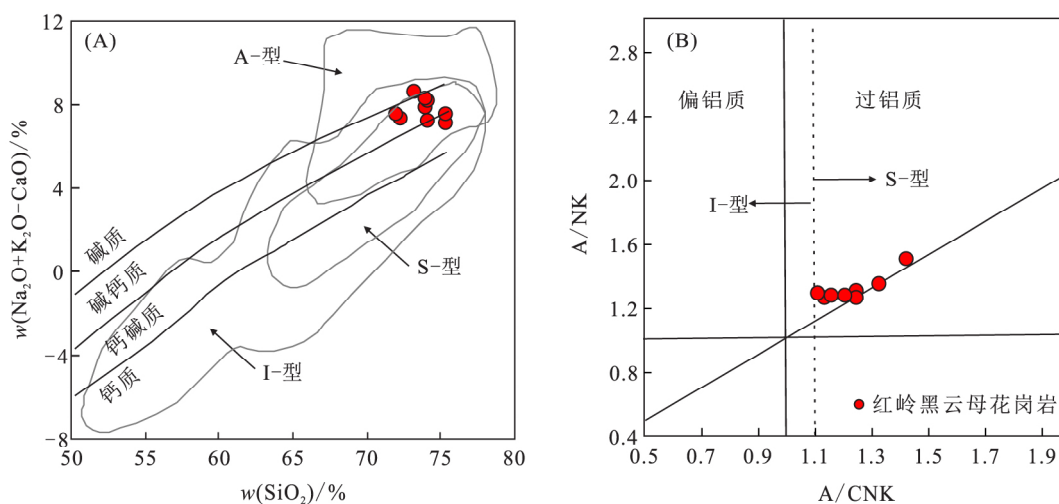


图 5 红岭黑云母花岗岩散点图
 Fig. 5 Diagram of whole-rock major elements from the Hongling biotite monzogranite
 (A) $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO})$ (Frost et al., 2001); (B) $A/CNK - A/NK$ (Maniar and Piccoli, 1989)

$\text{K}_2\text{O}]$ 介于 1.28~1.52 之间(图 5-B);全碱质量分数 $ALK(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 介于 7.92%~9.22% 之间,平均值为 8.45%。黑云母花岗岩的 CaO , MnO , P_2O_5 , MgO 和 TiO_2 质量分数皆极低,平均值仅分别为 0.62%, 0.08%, 0.11%, 0.44% 和 0.16%。里特曼指数 $[\sigma_{43} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)]$ 介于 1.9~2.8,平均值为 2.3,表明红岭黑云母花岗岩为钙碱性岩浆岩。

黑云母花岗岩稀土元素总量 ($\sum \text{REE}$) 较高(图 6),稀土元素总量介于 $(111.4 \sim 296.5) \times 10^{-6}$,

平均值为 225.3×10^{-6} 。LREE 和 HREE 的平均值分别为 205.4×10^{-6} 和 19.9×10^{-6} , LREE/HREE 变化范围为 6.7~18.7,平均值为 11.3,富集轻稀土元素。黑云母花岗岩的 Ce 异常 (Ce/Ce^*) 不明显, Eu 负异常明显, Eu/Eu^* 介于 0.28~0.39,平均值为 0.33。稀土元素的 $\text{TE}_{1,3}$ 值介于 0.93~1.04 之间,都低于 1.1,表明其四分组效应不明显,即分离结晶程度较低,且没有遭受大规模的岩浆期后热液蚀变改造。

表 1 红岭黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄
Table 1 Zircon U-Pb dating of Hongling biotite monzogranite

测点号	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		Rho	U-Pb 年龄/Ma		谐和度/%									
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$								
	1σ	1σ	1σ	1σ		1σ	1σ										
RS2022-12-01	610	6110	0.10	0.04932	0.00031	0.17443	0.00181	0.02564	0.00021	0.79	163.1	14.9	163.3	1.6	163.2	1.3	99.95
RS2022-12-02	613	2420	0.25	0.04962	0.00044	0.17381	0.00260	0.02542	0.00034	0.81	177.0	20.8	162.7	2.3	161.8	2.1	99.46
RS2022-12-03	294	4340	0.07	0.04924	0.00061	0.17282	0.00410	0.02542	0.00046	0.86	159.2	28.9	161.9	3.5	161.8	2.9	99.96
RS2022-12-04	1360	10100	0.13	0.04910	0.00053	0.17142	0.00444	0.02532	0.00058	0.91	152.5	25.3	160.7	3.9	161.2	3.6	99.65
RS2022-12-05	170	232	0.73	0.04995	0.00141	0.17301	0.00621	0.02512	0.00049	0.63	192.7	65.4	162.0	5.4	159.9	3.1	98.69
RS2022-12-06	1100	11100	0.10	0.04969	0.00047	0.17299	0.00259	0.02529	0.00033	0.78	180.4	22.1	162.0	2.2	161.0	2.1	99.38
RS2022-12-07	128	260	0.49	0.04960	0.00116	0.17434	0.00475	0.02548	0.00032	0.52	176.1	54.4	163.2	4.1	162.2	2.0	99.41
RS2022-12-08	364	999	0.36	0.04942	0.00092	0.17254	0.00406	0.02531	0.00042	0.62	167.6	43.6	161.6	3.5	161.1	2.7	99.70
RS2022-12-09	741	6030	0.12	0.04939	0.00032	0.17439	0.00232	0.02557	0.00029	0.87	166.5	15.2	163.2	2.0	162.7	1.8	99.71
RS2022-12-10	430	927	0.46	0.04986	0.00078	0.17350	0.00298	0.02534	0.00039	0.54	188.3	36.4	162.4	2.6	161.3	2.5	99.32
RS2022-12-11	723	2020	0.36	0.04940	0.00045	0.17205	0.00222	0.02527	0.00029	0.73	166.6	21.1	161.2	1.9	160.9	1.8	99.80
RS2022-12-12	131	261	0.50	0.04941	0.00119	0.17303	0.00462	0.02543	0.00031	0.43	167.5	56.4	162.0	4.0	161.9	1.9	99.89
RS2022-12-13	53.1	104	0.51	0.04973	0.00180	0.17440	0.00682	0.02541	0.00037	0.37	182.4	84.5	163.2	5.9	161.8	2.3	99.11
RS2022-12-14	1160	8200	0.14	0.04942	0.00040	0.17508	0.00212	0.02567	0.00023	0.74	167.9	19.1	163.8	1.8	163.4	1.5	99.75
RS2022-12-15	264	620	0.43	0.04894	0.00086	0.17107	0.00292	0.02547	0.00033	0.35	144.8	41.2	160.3	2.5	162.1	2.1	98.89
RS2022-12-16	116	181	0.64	0.04896	0.00134	0.17197	0.00480	0.02562	0.00034	0.28	145.7	64.3	161.1	4.2	163.1	2.1	98.80
RS2022-12-17	119	223	0.53	0.04941	0.00156	0.17200	0.00582	0.02529	0.00035	0.36	167.3	74.0	161.2	5.0	161.0	2.2	99.89
RS2022-12-18	167	376	0.44	0.04889	0.00110	0.17170	0.00481	0.02546	0.00038	0.60	142.6	52.6	160.9	4.2	162.1	2.4	99.27
RS2022-12-19	101	279	0.36	0.04929	0.00130	0.17126	0.00493	0.02526	0.00030	0.40	161.6	61.6	160.5	4.3	160.8	1.9	99.80
RS2022-12-20	998	4330	0.23	0.04940	0.00039	0.17301	0.00251	0.02544	0.00030	0.84	166.9	18.5	162.0	2.2	162.0	1.9	99.96

表 2 红岭黑云母花岗岩全岩主量(%)和微量元素(10^{-6})

Table 2 Whole-rock major and trace elements of Hongling biotite monzogranite

样品编号	深度/m	样品描述	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^f	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总和	Li
qyz1920-H1	1	表土层	74.43	0.124	15.60	2.42	0.039	0.26	0.08	0.53	2.10	0.067	4.82	100.47	27.2
qyz1920-H2	3	全风化层	70.65	0.205	17.19	3.36	0.065	0.37	0.07	0.28	2.85	0.054	4.85	99.94	23.2
qyz1920-H3	5	全风化层	69.56	0.315	17.23	3.98	0.072	0.42	0.09	0.70	3.30	0.080	4.75	100.50	30.8
qyz1920-H4	7	全风化层	68.95	0.410	16.21	5.37	0.103	0.36	0.08	0.36	3.04	0.073	4.90	99.86	30.0
qyz1920-H5	9	全风化层	69.22	0.354	15.71	4.96	0.147	0.43	0.08	0.91	4.03	0.078	4.04	99.96	29.4
qyz1920-H6	11	全风化层	71.63	0.230	15.31	3.70	0.115	0.39	0.09	1.58	3.99	0.075	4.36	101.47	33.6
qyz1920-H7	13	全风化层	69.15	0.348	15.70	4.43	0.186	0.39	0.08	0.53	4.57	0.070	3.94	99.39	34.8
qyz1920-H8	15	全风化层	67.56	0.364	16.14	4.86	0.170	0.36	0.08	0.64	5.04	0.078	3.92	99.21	32.0
qyz1920-H9	17	全风化层	70.31	0.269	15.49	3.74	0.156	0.38	0.08	0.70	5.34	0.077	3.54	100.08	46.6
qyz1920-H10	19	全风化层	72.02	0.256	14.90	3.67	0.111	0.43	0.09	0.59	4.53	0.078	3.60	100.28	34.2
qyz1920-H11	21	全风化层	71.54	0.223	15.27	3.20	0.093	0.34	0.12	0.64	5.07	0.076	3.59	100.16	29.4
qyz1920-H12	23	半风化层	71.82	0.235	15.29	3.01	0.062	0.37	0.09	0.66	5.04	0.074	3.86	100.51	40.9
RS2022-5	25	半风化层	73.08	0.232	14.58	2.61	0.157	0.40	0.09	1.94	5.40	0.072	1.94	100.50	57.0
RS2022-6	27	半风化层	77.05	0.041	12.73	1.83	0.102	0.33	0.09	0.62	6.07	0.073	1.32	100.25	26.9
RS2022-1	基岩	黑云母花岗岩	72.80	0.100	13.63	2.14	0.093	0.39	0.93	3.15	5.00	0.113	1.07	99.42	99.6
RS2022-2	基岩	黑云母花岗岩	74.05	0.041	13.38	1.82	0.051	0.26	0.83	3.14	4.76	0.132	1.00	99.46	83.9
RS2022-3	基岩	黑云母花岗岩	74.44	0.154	13.84	1.71	0.117	0.36	0.32	2.90	4.93	0.108	1.08	99.96	53.3
RS2022-4	基岩	黑云母花岗岩	72.84	0.188	14.08	2.14	0.064	0.43	0.51	2.81	5.51	0.093	1.18	99.84	107.0
RS2022-7	基岩	黑云母花岗岩	73.21	0.172	13.84	2.16	0.067	0.47	0.34	2.86	5.60	0.114	1.03	99.86	103.0
RS2022-8	基岩	黑云母花岗岩	71.61	0.213	14.32	2.51	0.093	0.54	1.23	2.91	5.67	0.125	0.78	100.00	85.5
RS2022-9	基岩	黑云母花岗岩	73.11	0.148	14.12	2.06	0.061	0.46	0.32	2.98	5.65	0.126	1.09	100.12	72.4
RS2022-10	基岩	黑云母花岗岩	70.86	0.288	15.24	2.62	0.074	0.66	0.53	2.30	5.78	0.121	2.13	100.60	71.5
RS2022-11	基岩	黑云母花岗岩	72.23	0.105	14.57	1.68	0.059	0.34	0.53	2.56	6.54	0.078	1.34	100.03	110.0

续表 2

样品编号	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
qyz1920-H1	4.79	4.13	11.2	2.86	2.53	2.300	3.24	35.3	21.0	1.69	351	5.71	55.1	166.0	25.7
qyz1920-H2	5.07	5.88	15.4	2.37	7.31	1.320	2.57	46.1	22.5	1.39	389	5.36	45.7	152.0	26.1
qyz1920-H3	6.90	9.53	22.1	8.11	7.75	1.630	3.70	62.2	28.5	1.96	477	9.34	80.9	245.0	42.1
qyz1920-H4	8.08	12.70	29.5	4.48	4.10	1.580	3.56	77.5	31.6	2.42	483	9.71	104.0	332.0	48.6
qyz1920-H5	5.53	6.72	21.1	7.09	4.28	11.200	2.89	59.8	24.9	2.29	454	19.80	116.0	181.0	30.4
qyz1920-H6	6.52	10.00	29.7	5.04	4.65	2.000	3.73	69.1	28.0	2.31	492	11.80	265.0	251.0	39.3
qyz1920-H7	7.16	9.67	34.2	7.12	6.62	2.760	3.38	67.6	28.1	2.17	554	28.60	314.0	223.0	42.2
qyz1920-H8	7.50	9.96	37.5	5.61	6.19	1.760	3.89	64.2	28.8	2.06	536	28.20	332.0	249.0	43.0
qyz1920-H9	6.45	8.06	28.2	5.51	5.32	2.260	4.36	63.5	25.3	2.09	592	34.70	278.0	205.0	38.8
qyz1920-H10	6.38	8.08	27.3	4.78	3.96	1.440	5.79	52.3	24.7	1.76	523	18.90	143.0	196.0	34.5
qyz1920-H11	5.60	5.64	23.0	4.68	3.14	1.620	3.36	51.8	22.2	1.86	501	23.00	111.0	183.0	33.0
qyz1920-H12	5.31	6.25	22.4	6.55	3.20	9.390	6.44	51.4	20.8	1.73	494	21.00	101.0	163.0	32.1
RS2022-5	21.30	7.20	20.2	3.84	2.82	1.020	15.50	151.0	22.9	1.56	511	18.10	130.0	168.0	46.1
RS2022-6	10.40	2.48	14.4	14.40	1.53	16.600	141.00	101.0	22.0	1.12	583	11.80	51.7	57.5	18.3
RS2022-1	23.90	4.20	12.6	6.84	2.12	1.770	4.75	98.4	22.2	1.61	410	81.10	18.5	125.0	28.4
RS2022-2	5.57	3.64	6.81	3.41	1.31	0.735	38.00	74.5	23.1	1.76	384	44.30	26.3	74.5	28.7
RS2022-3	12.00	5.13	16.6	3.79	1.75	0.757	14.80	64.8	21.5	1.65	422	39.50	47.9	124.0	25.5
RS2022-4	11.10	6.04	20.7	5.27	2.59	1.180	4.78	74.4	21.5	1.66	396	95.50	43.1	152.0	23.0
RS2022-7	7.45	4.87	17.6	4.15	2.00	1.170	36.60	128.0	20.2	1.26	391	70.40	23.9	158.0	24.4
RS2022-8	9.57	4.48	24.9	10.00	2.66	4.420	158.00	79.7	23.0	1.41	388	106.00	19.5	186.0	21.8
RS2022-9	11.50	4.20	14.1	4.98	1.93	1.480	12.60	108.0	21.8	1.27	373	72.50	25.5	151.0	24.2
RS2022-10	7.82	5.16	28.6	8.68	3.78	1.900	4.83	131.0	23.3	1.31	361	98.70	17.7	203.0	23.4
RS2022-11	8.48	5.40	15.0	4.12	2.13	1.230	3.02	84.3	20.6	1.67	456	63.30	41.5	123.0	22.5

续表 2

样品编号	Mo	In	Sn	Sb	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	As
qyz1920-H1	1.020	0.073	14.2	0.503	23.2	38.6	6.76	4.86	7.64	2.07	57.7	3.100	62.0	12.30	9.03
qyz1920-H2	1.520	0.081	14.8	0.445	27.3	48.4	5.98	3.82	5.84	2.45	96.0	1.280	74.1	13.40	11.60
qyz1920-H3	2.310	0.138	20.8	0.655	30.1	72.1	9.77	6.03	8.22	3.07	158.0	2.360	114.0	24.40	14.20
qyz1920-H4	3.190	0.173	24.4	0.917	31.9	78.4	12.80	6.07	10.20	3.53	216.0	2.410	148.0	30.60	15.90
qyz1920-H5	2.940	0.076	15.1	0.529	32.7	162.0	6.44	3.26	4.97	3.72	155.0	1.700	64.1	20.40	12.50
qyz1920-H6	3.500	0.128	24.1	0.586	45.9	129.0	9.68	4.59	9.45	4.87	147.0	2.740	96.0	28.40	19.20
qyz1920-H7	3.760	0.112	21.4	0.657	40.0	207.0	9.08	5.39	8.29	5.26	101.0	3.140	86.2	27.10	16.50
qyz1920-H8	3.510	0.125	25.7	0.720	38.4	280.0	9.97	5.60	9.03	6.34	129.0	5.080	77.0	34.30	23.80
qyz1920-H9	2.740	0.100	21.6	0.528	41.6	254.0	8.23	4.79	7.38	5.10	134.0	2.350	73.4	23.70	15.40
qyz1920-H10	2.680	0.091	19.1	0.474	31.9	183.0	7.46	4.42	13.70	3.95	72.6	2.400	71.6	24.10	11.80
qyz1920-H11	2.400	0.083	20.0	0.490	30.3	186.0	7.22	4.23	8.60	3.39	67.0	8.380	62.5	22.40	10.40
qyz1920-H12	2.790	0.076	16.5	0.709	28.1	210.0	5.94	3.69	8.44	3.28	61.2	1.910	57.2	23.70	13.60
RS2022-5	1.580	0.103	35.6	0.270	23.3	196.0	6.82	6.44	6.10	3.75	66.4	0.541	55.4	21.80	4.23
RS2022-6	15.200	0.316	20.2	0.288	34.0	218.0	2.93	2.64	3.93	3.82	203.0	66.500	15.9	26.30	6.93
RS2022-1	11.300	0.066	18.7	0.174	28.6	451.0	3.93	3.89	9.65	2.48	51.4	1.160	28.9	18.30	3.06
RS2022-2	57.300	0.131	32.3	0.158	21.6	169.0	2.83	6.87	203.00	2.22	47.0		20.0	23.00	3.05
RS2022-3	6.630	0.063	19.6	0.178	25.2	361.0	4.19	4.31	32.60	2.92	33.8	0.100	34.9	13.80	3.25
RS2022-4	1.550	0.047	17.6	0.197	23.8	447.0	5.04	3.09	2.92	2.37	58.0	0.089	39.3	14.60	3.46
RS2022-7	6.680	0.075	17.9	0.139	19.8	436.0	4.80	2.75	28.60	2.42	48.6	11.100	42.1	16.80	3.26
RS2022-8	3.330	0.149	20.8	0.336	21.4	538.0	5.53	1.86	64.10	2.46	57.3	80.300	48.6	9.24	4.52
RS2022-9	1.450	0.033	10.1	0.146	24.7	374.0	4.74	2.32	5.58	2.37	51.1	4.770	42.1	8.22	3.45
RS2022-10	1.080	0.029	10.1	0.378	23.8	588.0	5.82	2.09	3.72	2.25	51.1	2.340	45.2	10.90	3.91
RS2022-11	0.757	0.046	15.6	0.347	29.0	413.0	4.31	2.99	3.77	2.66	68.0	3.960	32.2	7.28	5.87

续表 2

样品编号	Ag	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
qyz1920-H1	0.414	42.2	132.0	11.0	42.1	9.00	0.222	7.96	1.390	9.41	2.040	5.96	0.918	5.78	0.848
qyz1920-H2	0.404	41.9	192.0	11.80	45.1	9.15	0.396	7.23	1.250	8.38	1.810	5.37	0.851	5.66	0.826
qyz1920-H3	0.731	129.0	241.0	38.30	161.0	28.90	0.838	17.40	2.720	15.70	3.280	9.61	1.450	9.43	1.380
qyz1920-H4	0.910	273.0	323.0	77.10	304.0	64.30	1.630	33.60	4.570	23.10	4.470	12.50	1.900	12.50	1.800
qyz1920-H5	0.632	256.0	235.0	63.40	239.0	68.00	2.440	43.90	5.530	28.20	5.340	15.10	2.170	13.60	1.950
qyz1920-H6	0.949	216.0	215.0	51.30	192.0	65.70	2.810	67.20	10.10	58.50	11.400	30.70	4.340	26.90	3.850
qyz1920-H7	1.040	154.0	256.0	36.20	142.0	44.60	2.090	56.20	9.960	62.40	12.600	34.10	4.980	29.80	4.240
qyz1920-H8	1.160	148.0	250.0	33.90	132.0	36.70	1.680	46.80	9.280	60.50	12.400	34.30	5.030	30.10	4.260
qyz1920-H9	1.010	133.0	238.0	30.10	119.0	31.20	1.410	36.70	7.390	49.60	10.200	28.10	4.090	24.40	3.400
qyz1920-H10	0.716	91.3	205.0	23.40	89.6	22.80	0.838	22.80	4.120	27.10	5.530	15.60	2.300	14.40	2.060
qyz1920-H11	0.708	84.8	171.0	21.50	81.4	19.50	0.691	18.50	3.250	20.80	4.290	12.10	1.840	11.30	1.610
qyz1920-H12	0.677	70.9	122.0	18.80	71.8	17.70	0.725	17.00	2.970	18.90	3.940	11.00	1.630	9.99	1.440
RS2022-5	0.842	56.8	115.0	19.10	71.3	19.10	1.480	17.50	3.480	23.50	4.990	14.70	2.560	18.40	2.760
RS2022-6	5.010	12.5	36.3	3.25	12.2	3.89	0.211	4.67	1.080	8.26	1.880	5.93	1.030	7.37	1.110
RS2022-1	0.466	42.1	77.3	8.58	29.6	5.85	0.621	4.52	0.666	3.50	0.588	1.54	0.210	1.36	0.194
RS2022-2	0.494	22.2	46.2	4.94	18.0	4.34	0.380	3.92	0.684	4.26	0.858	2.39	0.373	2.49	0.366
RS2022-3	0.484	61.2	82.5	15.90	58.6	12.20	1.150	9.88	1.600	9.30	1.750	4.71	0.727	4.76	0.687
RS2022-4	0.455	49.6	97.2	12.00	44.3	9.22	0.852	7.73	1.280	7.87	1.520	4.36	0.676	4.75	0.719
RS2022-7	0.484	49.0	100.0	11.20	39.2	7.27	0.670	5.06	0.763	4.23	0.790	2.27	0.348	2.31	0.332
RS2022-8	1.170	62.9	138.0	15.30	54.9	9.48	0.875	6.15	0.801	3.74	0.662	1.68	0.234	1.54	0.218
RS2022-9	0.390	65.4	106.0	15.50	56.7	10.80	0.921	8.25	1.040	4.80	0.797	1.94	0.240	1.42	0.198
RS2022-10	0.379	50.0	116.0	12.50	44.6	7.80	0.804	5.01	0.700	3.48	0.618	1.76	0.268	1.84	0.274
RS2022-11	0.382	40.5	79.2	9.00	31.8	6.91	0.607	5.84	1.040	6.52	1.370	4.10	0.709	4.93	0.734

黑云母花岗岩的 Rb 和 Sr 平均值分别为 398×10^{-6} 和 75×10^{-6} , Rb/Sr 值介于 3.7~10.7 之间, 平均为 6.0。Y 平均值为 29.3×10^{-6} , Sr/Y 值较低, 介于 0.8~5.6 之间, 平均为 3。Yb_N 值平均为 16.6, La_N/Yb_N (N 为球粒陨石值) 介于 5.9~33.0 之间, 平均值为 16.5。因此红岭黑云母花岗岩不具有埃达克质岩特征, 也不具有高分异特征。整体上黑云母花岗岩富集 Rb, Cs, U, K, Th 和 Pb 等; 亏损 Nb, Ta, Ti, Eu, Sr 和 Ba 等元素(图 6)。Li, Be, Cs, Nb 和 Ta 等稀有元素质量分数都较低, 平均值仅分别为 87.4×10^{-6} ,

70.8×10^{-6} , 24.2×10^{-6} , 24.7×10^{-6} 和 3.4×10^{-6} , 这些稀有元素成矿潜力较差。但是黑云母花岗岩的 Sn 和 W 质量分数较高, Sn 质量分数介于 10.1×10^{-6} 和 32.3×10^{-6} 之间, 平均值为 18.1×10^{-6} ; W 质量分数变化较大, 有一个样品的值高达 203×10^{-6} , 其余 8 件样品 W 质量分数介于 2.9×10^{-6} 和 64.1×10^{-6} 。因此黑云母花岗岩 Sn 和 W 成矿潜力较好; 并且由于其稀土元素总量较高, 尤其是轻稀土元素, 红岭黑云母花岗岩具有形成风化淋滤型稀土矿床的潜力。

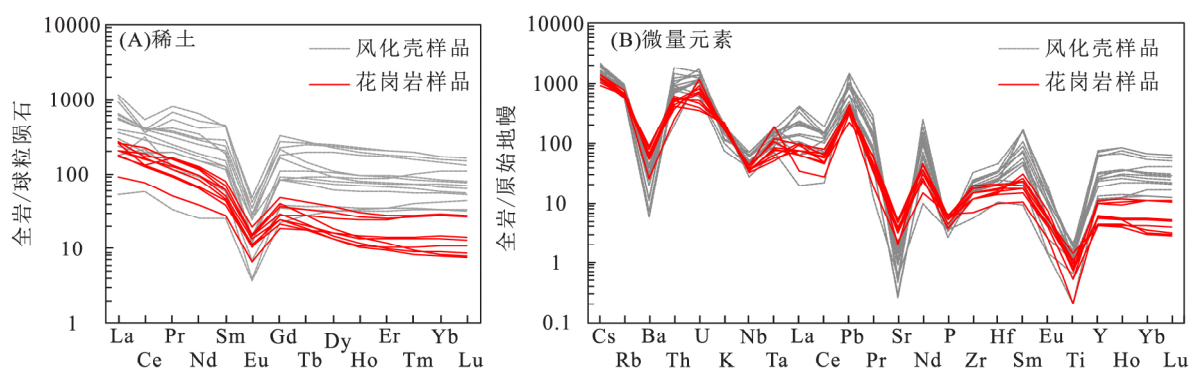


图 6 红岭黑云母花岗岩稀土和微量元素标准化蛛网图

Fig. 6 Normalized spider diagrams of the rare earth elements and trace elements of Hongling biotite monzogranite (标准化值引用自 Sun and McDonough, 1989)

3.3 风化壳元素地球化学

表土层中的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 质量分数都较高, 分别为 77.81% 和 16.31%, 高于深部新鲜花岗岩, 其 Σ REE 质量分数 (270.8×10^{-6}) 也稍高于新鲜花岗岩(表 2); 但是其 CaO, Na₂O 和 K₂O 较低, 分别为 0.08%, 0.55% 和 2.20%, 这导致其 A/CNK 和 A/NK 值很高, 分别为 4.7 和 5.0。与此同时, 其化学蚀变指数 CIA 值 [$Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \times 100$] (Nesbitt and Young, 1982) 和 风化指数 WIP 值 [$100 \times (2Na_2O/0.35 + 2K_2O/0.25 + MgO/0.9 + CaO^*/0.7)$] (Parker, 1970) 分别较高 (82.6) 和 较低 (23.7), 表明其经历了较强的风化过程(图 7)。

随着深度的增加, 风化层的 CIA 值和 WIP 值分别小于和大于表土层的值。此外, 随着深

度的增加, 风化层中 Al₂O₃ 质量分数降低, K₂O 质量分数增加, CaO 质量分数变化不大, 整体上风化层的 A/CNK 值和 A/NK 值逐渐小于表土层, 并与新鲜花岗岩的值接近。全风化层的 Σ REE 整体较高, 平均值为 741.5×10^{-6} , 在垂向上整体呈现“浅伏式”特征(赵芝等, 2017)(图 7-C); 其中 LREE 平均值为 615.1×10^{-6} , 在第 7 m 处最高, 质量分数为 1043.0×10^{-6} (图 7-D); HREE 平均值为 126.4×10^{-6} , 在第 13 m 处最高, 质量分数为 214.3×10^{-6} (图 7-E)。Ce 异常值在第 3 m 处最高 (2.1), 其他各层整体表现为低异常 (平均值为 0.8)。Eu 异常值都较低, 平均值为 0.12。半风化层的 Σ REE 平均值为 279.7×10^{-6} , 其地球化学特征与新鲜花岗岩无异(图 7)。

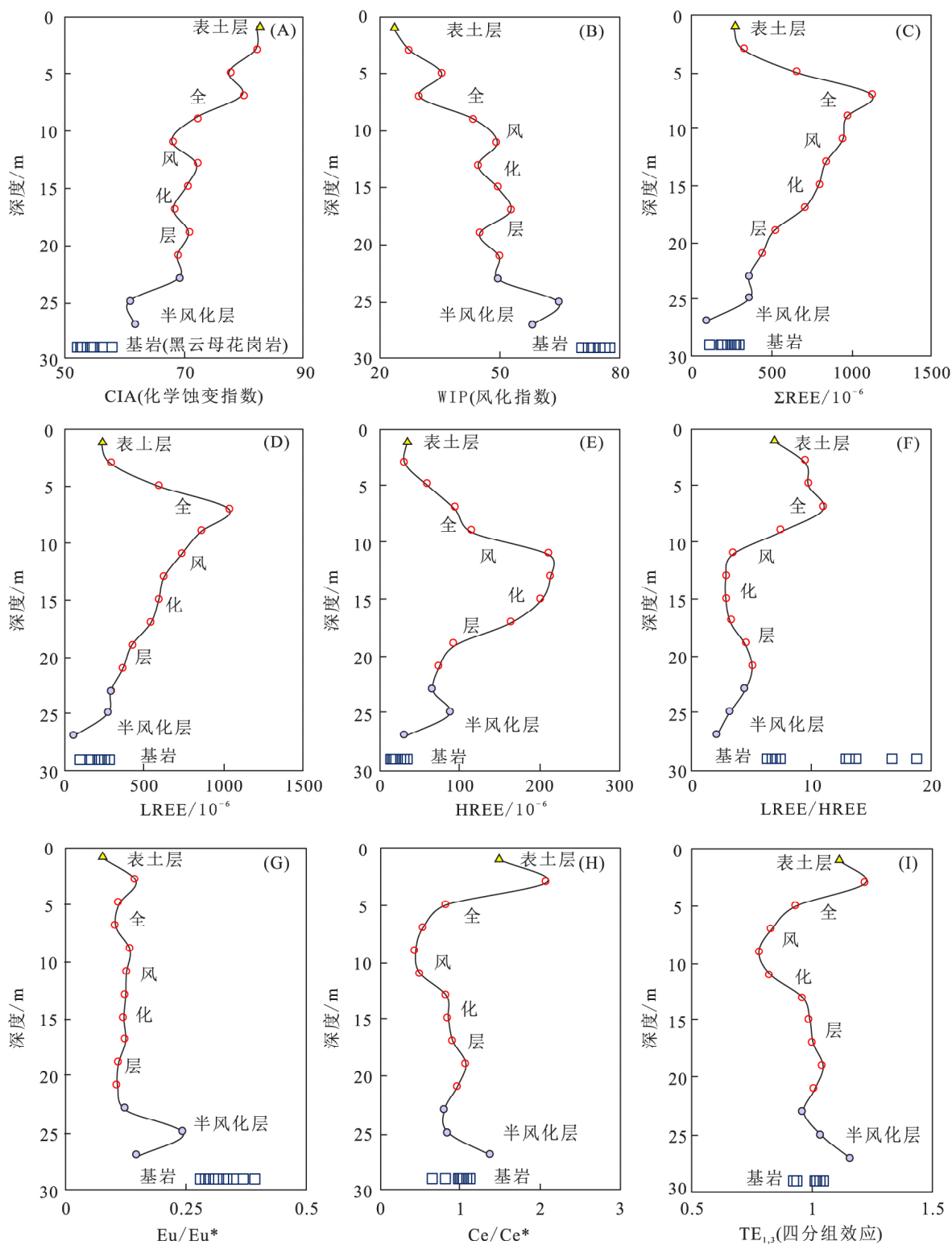


图 7 红岭地区风化壳剖面与基岩(黑云母花岗岩)随深度变化的元素变化规律

Fig. 7 The chemical element variation trend of the profile of the weathered crust and the bedrock (biotite monzonitic granite) in the Hongling area

(A)化学蚀变指数;(B)风化指数;(C)稀土元素总量;(D)轻稀土元素总量;
(E)重稀土元素总量;
(F)轻/重稀土元素稀土值;(G)Eu异常值;(H)Ce异常值;(I)稀土元素四分组效应值

4 讨论

4.1 红岭黑云母花岗岩年龄和成因

大东山—贵东山花岗岩带主要包括晚志留纪加里东期、中—晚三叠纪印支期和中—晚侏罗纪燕山期的三期中—酸性侵入岩。加里东期侵入岩包括 429 Ma 的河口次英安斑岩(林坤等, 2021)和 430 Ma 的梅子窝黑云母花岗闪长岩(翟伟等, 2010)。印支期侵入岩为 239 Ma 的鲁溪含角闪石黑云母花岗岩和 236 Ma 的下庄二云母花岗岩(徐夕生等, 2003)、燕山早期是该岩浆岩带的主要形成时期, 包括 175 Ma 的大宝山次英安斑岩(王磊等, 2012)、163 Ma 的良源黑云母花岗岩(范飞鹏等, 2022)、162 Ma 的桃村坝黑云母花岗岩(单芝波等, 2014)、161 Ma 的竹山下白云母花岗岩(王联社等, 2010)、160 Ma 的隘子含角闪石黑云母花岗岩(徐夕生等, 2003)、158 Ma 的瑶岭黑云母花岗岩(翟伟等, 2011)、151 Ma 的司前二云母花岗岩(徐夕生等, 2003)、及大东山地区 165 Ma 的黑云母二长花岗岩和 159 Ma 的黑云母钾长花岗岩(黄会清等, 2008)。研究区北侧的热水中粗粒似斑状黑云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 163 Ma(邓平等, 2011)。研究区南侧红岭钨矿中—细粒白云母花岗岩中辉钼矿 Re-Os 年龄为 159 Ma(王小飞等, 2010), 稍晚于红岭含矿白云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄(161.9 Ma; 吴剑, 2017)。而本次研究的少斑黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 162 Ma, 介于热水—红岭的似斑状黑云母花岗岩和白云母花岗岩之间(图 4), 并与上述大东山—贵东山花岗岩带的燕山早期的花岗岩成岩时间一致。从热水—红岭的似斑状黑云母花岗岩, 经黑云母二长花岗岩到白云母花岗岩, 年龄逐渐变新, 符合岩浆高分异演化的特征(刘红娜, 2021)。

红岭黑云母花岗岩全岩 Zr 饱和温度和 LREE 饱和温度值都较高, 平均值分别为 791 °C 和 854 °C, 因此该黑云母花岗岩的结晶温度在 800~850 °C 之间, 但是稍低于典型的 A 型花岗岩的形成温度(Guo et al., 2022)。红岭黑云母花岗岩的 $10\,000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 介于 2.8~3.2 之间, 平均值为 2.9; $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 值介于 $(175.7 \sim 360.1) \times 10^{-6}$, 平均值为 291.6×10^{-6} 。尽管这 2 个的参数值较高, 但是岩浆的高分异过程也可以解释这个现象(吴福元等, 2017; 王鹏等, 2023; 吴兴源等,

2023)。热水—红岭岩体中没有角闪石, 暗色矿物以黑云母为主(图 3), 甚至高分异演化成白云母花岗岩, 因此不属于 I 型花岗岩(Cao et al., 2022)。不仅本次研究的黑云母花岗岩具有过铝质特征(A/CNK 平均值 1.21), 似斑状黑云母花岗岩的 A/CNK 值也远远大于 1.1(1.13~1.16; 邓平等, 2011), 因此热水—红岭复式岩体为过铝质 S 型花岗岩。此外, 前人研究认为热水—红岭的似斑状黑云母花岗岩具有高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值(0.713), 低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(平均值为 -10.17)(邓平等, 2011), 表明其起源于古老壳源沉积物。红岭黑云母花岗岩的大地构造背景与南岭地区广泛发育的中—晚侏罗统含 Sn-W 过铝质 S 型花岗岩的起源一致, 即太平洋洋壳板块向华南大陆板块下俯冲导致的弧后伸展背景并诱发下地壳古老沉积物的部分熔融(Mao et al., 2021)。

4.2 红岭离子吸附型稀土矿成因

华南地区气候温和, 夏季炎热潮湿, 冬季干燥(Chu et al., 2023), 化学风化作用强, 这导致成矿母岩(主要是花岗岩)中富集 REE 的矿物(氟碳铈矿、磷灰石、磷钇矿、独居石、褐帘石和榍石等)发生分解, REE 被释放出来后随淋滤下渗的溶液一起向下迁移并在风化壳的深部富集, 而长石和云母等硅酸盐矿物风化形成的黏土矿物(埃洛石和高岭土)和铁锰氧化物等, 这些矿物是 REE 被吸附的载体(梁晓亮等, 2022)。红岭花岗岩的 LREE/HREE 值较高(平均值为 11.3), LREE 最富集的层位是第 7 m 深处(LREE/HREE 值为 11), 而 HREE 最富集的层位是 13 m 处(LREE/HREE 值为 3)(图 7-F)。华南江西“河岭式”风化壳中的离子吸附型稀土矿床在垂向剖面上通常具有上部富集 LREE、下部富集 HREE 的规律(赵芝等, 2022), 韶关红岭离子吸附型稀土矿床的特征与此一致。红岭风化壳的化学蚀变指数 CIA 值(图 7-A)与 $\sum\text{REE}$ (图 7-C)呈现正相关性, 这表明风化过程在离子型吸附型 REE 富集过程中扮演了重要的角色, 因此强烈的风化作用区是寻找该类型矿床的重要靶区。

在岩浆作用晚期的岩浆热液过渡阶段, 花岗岩常发生不同程度的自蚀变过程, 比如微斜长石化、绢英岩化、云英岩化、硅化、黏土化等蚀变。热液蚀变作用对花岗岩后期稀土元素的迁移富集成矿具有重要促进作用(黄玉凤等, 2022)。本次研

究没有对红岭黑云母花岗岩开展详细的矿物学研究,因此尚不清楚红岭岩体是否发生了岩浆热液作用导致的矿物蚀变过程,建议在以后的工作中应该加强矿物学方面的研究。

5 结论

a. 红岭黑云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(162.0 \pm 0.5) \text{Ma}$, 与南岭地区钨锡稀有金属成矿时代吻合。红岭花岗岩属于钙碱性岩浆岩,起源于下地壳变沉积岩部分熔融形成的 S 型花岗岩。

b. 红岭风化层的稀土元素质量分数整体较高,最高值为 $1\ 137.5 \times 10^{-6}$, 平均值为 608.9×10^{-6} ; 轻重稀土元素比值平均为 5.5, 属于轻稀土元素富集型。风化壳上部富集 LREE, 而下部相对更富集 HREE。

c. 红岭花岗岩 ΣREE 较高(平均值为 225.3×10^{-6}), 并且风化层中高的化学蚀变指数表明研究区具有较好的离子吸附型稀土矿的找矿潜力。

[参 考 文 献]

- 陈琿,曾土荣,朱金林,等,2022. 粤北韶关地区不同岩性区地热流体地球化学特征及成因分析[J]. 矿物岩石, 42(2):125-135.
- Chen H, Zeng S R, Zhu J L, *et al.*, 2022. Geochemical characteristics and genetic analysis of geothermal fluid in different lithologic areas in Shaoguan area, northern Guangdong Province [J]. *Mineralogy and Petrology*, 42(2):125-135. (in Chinese)
- 陈琿,朱金林,曾金金,等,2023. 广东韶关构造复杂区温泉分布规律与控制因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 50(1):101-110.
- Chen H, Zhu J L, Zeng J J, *et al.*, 2023. Study on the distribution and controlling factors of hot springs in the complex structural area in Shaoguan area, Guangdong, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 50(1):101-110. (in Chinese)
- 陈剑锋,杜云,熊伊曲,等,2023. 南岭加里东期钨锡矿床成矿机制研究:以湘西南落家冲矿床为例[J]. 岩石学报, 39(6):1693-1716.
- Chen J F, Du Y, Xiong Y Q, *et al.*, 2023. Ore forming mechanism of Caledonian W-Sn deposit in the Nanling Range: A case study from the Luojiachong deposit, southwestern Hunan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(6):1693-1716. (in Chinese)
- 陈骏,王汝成,朱金初,等,2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用[J]. 中国科学:地球科学, 44(1):111-121.
- Chen J, Wang R C, Zhu J C, *et al.*, 2014. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 44(1):111-121. (in Chinese)
- 邓平,凌洪飞,沈渭洲,等,2011. 粤北热水岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征研究[J]. 地质学报, 85(8):1274-1283.
- Deng P, Ling H F, Shen W Z, *et al.*, 2011. SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemical of the Reshui granite in Guangdong Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(8):1274-1283. (in Chinese)
- 范飞鹏,肖惠良,陈乐柱,等,2022. 粤北良源铌钽铷钨矿床地质、成岩成矿时代与成矿模式[J]. 岩石学报, 38(2):393-410.
- Fan F P, Xiao H L, Chen L Z, *et al.*, 2022. Deposit geology, geochronology and metallogenic model of Liangyuan Nb-Ta-Rb-W deposit in northern Guangdong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(2):393-410. (in Chinese)
- 范宏瑞,牛贺才,李晓春,等,2020. 中国内生稀土矿床类型、成矿规律与资源展望[J]. 科学通报, 65(33):3778-3793.
- Fan H R, Niu H C, Li X C, *et al.*, 2020. The types, ore genesis and resource perspective of endogenic REE deposits in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 65(33):3778-3793. (in Chinese)
- 奉大博,董树义,杨棣,等,2022. 广东韶关乐昌铅锌矿土壤重金属污染特征及评价[J]. 矿物岩石, 42(3):123-133.
- Feng D B, Dong S Y, Yang L, *et al.*, 2022. Characteristics and evaluation of soil heavy metal pollution in Lechang lead-zinc mine, Shaoguan City, Guangdong Province [J]. *Mineralogy and Petrology*, 42(3):123-133. (in Chinese)
- 付伟,赵芹,罗鹏,等,2022. 中国南方离子吸附型稀土矿床成矿类型及其母岩控矿因素探讨[J]. 地质学报, 96(11):3901-3925.
- Fu W, Zhao Q, Luo P, *et al.*, 2022. Mineralization diversity of ion-adsorption type REE deposit in southern China and the critical influence of parent rocks [J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(11):3901-3925. (in Chinese)
- 黄会清,李献华,李武显,等,2008. 南岭大东山花岗岩的

- 形成时代与成因——SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学[J]. 高校地质学报, 14(3):317-333.
- Huang H Q, Li X H, Li W X, *et al.*, 2008. Age and origin of the Dadongshan granite from the Nanling Range: SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. Geological Journal of China Universities, 14(3):317-333. (in Chinese)
- 黄玉凤, 谭伟, 包志伟, 等, 2022. 母岩特征对上犹复式岩体中风化壳离子吸附型重稀土矿形成的制约[J]. 大地构造与成矿学, 46(2):303-317.
- Huang Y F, Tan W, Bao Z W, *et al.*, 2022. Constraints of parent rocks on the formation of ion adsorption HREE deposit in the weathering crust of the Shangyou granite batholith[J]. Geotectonica et Metallogenia, 46(2):303-317. (in Chinese)
- 李超, 舒荣波, 程蓉, 等, 2023. 不同深度离子型稀土矿连续浸出实验[J]. 矿产综合利用, (4):78-82.
- Li C, Shu R B, Cheng R, *et al.*, 2023. Continuous leaching test of ion-type rare earth ore at different depths[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, (4):78-82. (in Chinese)
- 李文昌, 李建威, 谢桂青, 等, 2022. 中国关键矿产现状、研究内容与资源战略分析[J]. 地学前缘, 29(1):1-13.
- Li W C, Li J W, Xie G Q, *et al.*, 2022. Critical minerals in China: Current status, research focus and resource strategic analysis[J]. Earth Science Frontiers, 29(1):1-13. (in Chinese)
- 梁晓亮, 谭伟, 马灵涯, 等, 2022. 离子吸附型稀土矿床形成的矿物表/界面反应机制[J]. 地学前缘, 29(1):29-41.
- Liang X L, Tan W, Ma L Y, *et al.*, 2022. Mineral surface reaction constraints on the formation of ion-adsorption rare earth element deposits[J]. Earth Science Frontiers, 29(1):29-41. (in Chinese)
- 林坤, 李海东, 刘斌, 等, 2021. 粤北河口岩体次英安斑岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 57(2):392-401.
- Lin K, Li H D, Liu B, *et al.*, 2021. Zircon U-Pb chronology and Hf isotope, composition of porphyritic dacite in Hekou rock mass of northern Guangdong and their geological implications[J]. Geology and Exploration, 57(2):392-401. (in Chinese)
- 刘红娜, 2021. 红岭钨矿区花岗岩地球化学特征及成因[J]. 西部探矿工程, 33(5):165-169.
- Liu H N, 2021. Geochemical characteristics and genesis of granite in Hongling tungsten deposit[J]. West-China Exploration Engineering, 33(5):165-169. (in Chinese)
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏, 2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究:现状与前景[J]. 中国科学:地球科学, 44(12):2593-2617.
- Mao J R, Li Z L, Ye H M, 2014. Mesozoic tectonomagmatic activities in South China: Retrospect and prospect[J]. Science China, Earth Sciences, 44(12):2593-2617. (in Chinese)
- 毛景文, 宋世伟, 刘敏, 等, 2022. 稀土矿床:基本特点与全球分布规律[J]. 地质学报, 96(11):3675-3697.
- Mao J W, Song S W, Liu M, *et al.*, 2022. REE deposits: Basic characteristics and global metallogeny[J]. Acta Geologica Sinica, 96(11):3675-3697. (in Chinese)
- 毛禹杰, 邵拥军, 熊伊曲, 等, 2021. 湘东邓阜仙 Nb-Ta-W-Sn-Pb-Zn 岩浆热液成矿系统:铋钽锰矿 U-Pb 年代学约束[J]. 中南大学学报(自然科学版), 52(9):2959-2972.
- Mao Y J, Shao Y J, Xiong Y Q, *et al.*, 2021. Magmatic-hydrothermal metallogenic system in Nb-Ta-W-Sr-Pb-Zn Dengfuxian orefield, eastern Hunan: Constraint from U-Pb geochronology of columbite-tantalite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 52(9):2959-2972. (in Chinese)
- 单芝波, 李坤, 凌洪飞, 等, 2014. 粤北桃村坝花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因研究[J]. 高校地质学报, 20(3):341-352.
- Shan Z B, Li K, Ling H F, *et al.*, 2014. Zircon U-Pb Geochronology, geochemistry, and petrogenesis of the Taocunba granite, northern Guangdong Province[J]. Geological Journal of China Universities, 20(3):341-352. (in Chinese)
- 孙涛, 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 25(3):332-335.
- Sun T, 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes[J]. Geological Bulletin of China, 25(3):332-335. (in Chinese)
- 汪相, 楼法生, 2022. 论岩浆热液矿床的成矿期——以南岭地区燕山期钨矿为例[J]. 地质论评, 68(2):507-530.
- Wang X, Lou F S, 2022. On the ore-forming period of magmatic-hydrothermal deposits—A case study of the Yanshanian tungsten deposits in the Nanling Range[J]. Geological Review, 68(2):507-530. (in Chinese)

- Chinese)
- 王登红,赵芝,于扬,等,2013. 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.
- Wang D H, Zhao Z, Yu Y, *et al.*, 2013. Progress, problems and research orientation of ion-adsorption type rare earth resources [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32(5):796—802. (in Chinese)
- 王磊,胡明安,屈文俊,等,2012. 粤北大宝山多金属矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 39(1):29—42.
- Wang L, Hu M A, Qu W J, *et al.*, 2012. Zircon LA-ICP-MS U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Dabaoshan polymetallic deposit in northern Guangdong Province and its geological implications [J]. *Geology in China*, 39(1):29—42. (in Chinese)
- 王联社,邓平,朱捌,等,2010. 粤北竹山下岩体锆石 U-Pb 同位素定年及其地球化学特征[J]. 铀矿地质, 26(5): 264—270.
- Wang L S, Deng P, Zhu B, *et al.*, 2010. U-Pb isotopic dating of zircon and geochemical characteristics of Zhushanxia pluton northern Guangdong [J]. *Uranium Geology*, 26(5):264—270. (in Chinese)
- 王鹏,白建科,王雁鹤,等,2023. 松潘—甘孜地块中西部晚三叠纪花岗岩体成因及其构造意义[J]. 西北地质, 56(5):223—244.
- Wang P, Bai J K, Wang Y H, *et al.*, 2023. Petrogenesis and tectonic implication of Late-Triassic granitoids in the west-central part of Songpan-Ganze block [J]. *Northwestern Geology*, 56(5):223—244. (in Chinese)
- 王小飞,戚华文,胡瑞忠,等,2010. 粤北红岭钨矿中辉钼矿 Re-Os 同位素年代学及其地质意义[J]. 矿床地质, 29(3):415—426.
- Wang X F, Qi H W, Hu R Z, *et al.*, 2010. Re-Os isotopic chronology of molybdenites from Hongling tungsten deposit of Guangdong Province and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 29(3):415—426. (in Chinese)
- 王岩,王登红,秦锦华,等,2023. 南岭东段区域成矿规律与成矿预测[J]. 地质学报, 97(4):1315—1328.
- Wang Y, Wang D H, Qin J H, *et al.*, 2023. Regional metallogenic regularity and metallogenic prediction in the eastern Nanling [J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(4): 1315—1328. (in Chinese)
- 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[J]. 地质学报, (4): 349—362.
- Wu C Y, Huang D H, Guo Z X, 1989. REE geochemistry in the weathering process of granites in Longan County, Jiangxi Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, (4):349—362. (in Chinese)
- 吴福元,郭春丽,胡方决,等,2023. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿[J]. 岩石学报, 39(1):1—36.
- Wu F Y, Guo C L, Hu F Y, *et al.*, 2023. Petrogenesis of the highly fractionated granites and their mineralizations in Nanling Range, South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(1):1—36. (in Chinese)
- 吴福元,刘小驰,纪伟强,等,2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学:地球科学, 47(7):745—765.
- Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, *et al.*, 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research [J]. *Science China: Earth Sciences*, 47(7):745—765. (in Chinese)
- 吴剑,2017. 广东省红岭钨矿成矿地质模型与找矿预测 [D]. 武汉:中国地质大学档案馆.
- Wu J, 2017. Ore Geological Model of Hongling Tungsten Deposit in Guangdong and Its Prospecting [D]. Wuhan: The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese)
- 吴兴源,刘晓阳,赵晓博,等,2023. 中部非洲淡色花岗岩(约1.0 Ga)的年代学、岩石地球化学特征、构造背景及其与成矿的关系[J]. 西北地质, 56(5):1—19.
- Wu X Y, Liu X Y, Zhao X B, *et al.*, 2023. Geochronology, petrogeochemical characteristics, tectonic setting of the leucogranites (~1.0 Ga) in Central Africa and its relationship with mineralization [J]. *Northwestern Geology*, 56(5):1—19. (in Chinese)
- 徐夕生,邓平, O'Reilly S Y, 等, 2003. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义 [J]. 科学通报, 48(12):1328—1334.
- 徐先兵,梁承华,陈家驹,等,2021. 南岭构造带基础地质特征与成矿地质背景[J]. 地球科学, 46(4):1133—1150.
- Xu X B, Liang C H, Chen J J, *et al.*, 2021. Fundamental geological features and metallogenic geological backgrounds of Nanling tectonic belt [J]. *Earth Science*, 46(4):1133—1150. (in Chinese)
- 姚玉玲,代力,舒荣波,等,2022. 赣南某未开发离子型稀土矿区土壤环境质量评价[J]. 矿产综合利用, (4): 152—156.
- Yao Y L, Dai L, Shu R B, *et al.*, 2022. Soil environmental quality assessment around the undeveloped ion ad-

- sorption type rare earth ore in southern Jiangxi [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, (4): 152–156. (in Chinese)
- 张林奎, 李光明, 曹华文, 等, 2022. 西藏冈底斯中段晚侏罗世许如错花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年龄、地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素证据 [J]. 矿物岩石, 42(1): 54–67.
- Zhang L K, Li G M, Cao H W, *et al.*, 2022. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic evidence for the late Jurassic Xurucuo granites in the middle Gangdese area, Tibet [J]. Mineralogy and Petrology, 42(1): 54–67. (in Chinese)
- 张苏江, 张立伟, 张彦文, 等, 2020. 国内外稀土矿产资源及其分布概述 [J]. 无机盐工业, 52(1): 9–16.
- Zhang S J, Zhang L W, Zhang Y W, *et al.*, 2020. Summarize on rare earth mineral resources and their distribution at home and abroad [J]. Inorganic Chemicals Industry, 52(1): 9–16. (in Chinese)
- 赵芝, 王登红, 陈振宇, 等, 2014. 江西龙南稀土花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、内生矿化特征及成因讨论 [J]. 地球学报, 35(6): 719–725.
- Zhao Z, Wang D H, Chen Z Y, *et al.*, 2014. Zircon U-Pb age, endogenic mineralization and petrogenesis of rare earth ore-bearing granite in Longnan, Jiangxi Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(6): 719–725. (in Chinese)
- 赵芝, 王登红, 陈郑辉, 等, 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.
- Zhao Z, Wang D H, Chen Z H, *et al.*, 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)
- 赵芝, 王登红, 邹新勇, 2022. “寨背式”离子吸附型稀土矿床多类型稀土矿化及其成因 [J]. 岩石学报, 38(2): 356–370.
- Zhao Z, Wang D H, Zou X Y, 2022. The genesis and diversity of ion adsorption REE mineralization in the Zhai-bei deposit, Jiangxi Province, South China [J]. Acta Petrologica Sinica, 38(2): 356–370. (in Chinese)
- 翟伟, 孙晓明, 邬云山, 等, 2010. 粤北梅子窝钨矿区隐伏花岗岩闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 成矿年龄及其地质意义 [J]. 高校地质学报, 16(2): 177–185.
- Zhai W, Sun X M, Wu Y S, *et al.*, 2010. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the buried granodiorite and muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of mineralization and geological implications of Meiziwo tungsten deposit, northern Guangdong Province, China [J]. Geological Journal of China Universities, 16(2): 177–185. (in Chinese)
- 翟伟, 孙晓明, 邬云山, 等, 2011. 粤北瑶岭钨矿成矿相关花岗岩的锆石 SHRIMP 年龄与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 成矿年龄及其地质意义 [J]. 矿床地质, 30(1): 21–32.
- Zhai W, Sun X M, Wu Y S, *et al.*, 2011. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of Yaoling tungsten deposit in northern Guangdong Province and SHRIMP U-Pb zircon age of related granites [J]. Mineral Deposits, 30(1): 21–32. (in Chinese)
- 周美夫, 李欣禧, 王振朝, 等, 2020. 风化壳型稀土和钽矿床成矿过程的研究进展和展望 [J]. 科学通报, 65(33): 3809–3824.
- Zhou M F, Li M Y H, Wang Z C, *et al.*, 2020. The genesis of regolith-hosted rare earth element and scandium deposits: Current understanding and outlook to future prospecting [J]. Chinese Science Bulletin, 65(33): 3809–3824. (in Chinese)
- 周新民, 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化 [M]. 北京: 科学出版社.
- Zhou X M, 2007. Genesis and Lithospheric Dynamic Evolution of Late Mesozoic Granites in Nanling Area [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Cao H W, Pei Q M, Santosh M, *et al.*, 2022. Himalayan leucogranites: A review of geochemical and isotopic characteristics, timing of formation, genesis, and rare metal mineralization [J]. Earth-Science Reviews, 234: 104229.
- Chu G, Chen H, Feng Y, *et al.*, 2023. Are South China granites special in forming ion-adsorption REE deposits [J]. Gondwana Research, 125: 82–90.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, *et al.*, 2001. A geochemical classification for granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 42(11): 2033–2048.
- Guo J, Zheng Y F, Zhao Z F, *et al.*, 2022. Generation of aluminous A-type granite by partial melting of felsic restite: Evidence from Mesozoic granitoids in the southern margin of the North China Craton [J]. Lithos, 428–429: 106837.
- Huang W, Wu J, Liang H, *et al.*, 2020. Ages and genesis of W-Sn and Ta-Nb-Sn-W mineralization associated with the Limu granite complex, Guangxi, China [J]. Lithos, 352–353: 105321.

- betan Plateau; Evidence for basin formation during Oligocene transtension[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 142: 113–137.
- Wang X X, Song C H, Zattin M, *et al.*, 2016. Cenozoic pulsed deformation history of northeastern Tibetan Plateau reconstructed from fission-track thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 212–227.
- Xue L, Gani N D, Abdelsalam M G, 2017. Geomorphologic proxies for bedrock rivers: A case study from the Rwenzori Mountains, East African Rift system[J]. *Geomorphology*, 285: 374–398.
- Zhang P, 1988. Rate, amount, and style of late Cenozoic deformation of southern Ningxia, northeastern margin of Tibetan Plateau, China[J]. *Massachusetts Institute of Technology*.
- Zhang P Z, Shen Z, Wang M, *et al.*, 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. *Geology*, 32(9): 809–812.
- Zhang Z H, Pan Z Y, 2023. Geodetic and seismic constraints on contemporary deformation on the northeastern Tibetan plateau: Velocity and strain rate tensor analysis[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 338: 107014.
- Zheng D W, Zhang P Z, Wan J L, *et al.*, 2006. Rapid exhumation at similar to 8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters; A Letter Journal Devoted to the Development in Time of the Earth and Planetary System*, (1–2): 198–208.
- Zheng W J, Zhang P Z, He W G, *et al.*, 2013. Transformation of displacement between strike-slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: Evidence from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults[J]. *Tectonophysics*, 584: 267–280.
- Zhou S, Hu C, Zhang K J, *et al.*, 2022. Tectonic evolution of the Liupan Shan fold-and-thrust belt, NE Tibetan Plateau during the late Cenozoic: Numerical simulations[J]. *Geophysical Journal International*, 231(3): 1604–1617.

(责任编辑:魏 崑)

(上接第 578 页)

- Li M Y H, Zhao W W, Zhou M F, 2017. Nature of parent rocks, mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: An integrated genetic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 148: 65–95.
- Maniar P D, Piccoli P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643.
- Mao J, Zheng W, Xie G Q, *et al.*, 2021. Recognition of a Middle-Late Jurassic arc-related porphyry copper belt along the southeast China coast: Geological characteristics and metallogenic implications[J]. *Geology*, 49(5): 592–596.
- Nesbitt H W, Young G M, 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Parker A, 1970. An index of weathering for silicate rocks [J]. *Geological Magazine*, 107(6): 501–504.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345.
- Yuan S, Mao J, Cook N J, *et al.*, 2015. A Late Cretaceous tin metallogenic event in Nanling W-Sn metallogenic province: Constraints from U-Pb, Ar-Ar geochronology at the Jiepailing Sn-Be-F deposit, Hunan, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 283–293.
- Zhang S, Zhang R, Lu J, *et al.*, 2019. Neoproterozoic tin mineralization in South China: Geology and cassiterite U-Pb age of the Baotan tin deposit in northern Guangxi[J]. *Mineralium Deposita*, 54(8): 1125–1142.

(责任编辑:黄维婷)