

引用格式: 陈迪, 罗鹏, 曾志方, 等, 2022. 湘南都庞岭复式花岗岩成因及地质意义: 矿物化学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Nd-Hf 同位素制约 [J]. 地质力学学报, 28 (4): 617–641. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021146

Citation: CHEN D, LUO P, ZENG Z F, et al., 2022. Petrogenesis and implications of the Dupangling compound granite in southern Hunan Province, China: Constraints from mineralogical chemistry, zircon U-Pb age, geochemistry and Nd-Hf isotope [J]. Journal of Geomechanics, 28 (4): 617-641. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021146

湘南都庞岭复式花岗岩成因及地质意义：矿物化学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Nd-Hf 同位素制约

陈 迪, 罗 鹏, 曾志方, 梁恩云, 彭云益, 贾鹏远, 熊 苗, 邹光均
CHEN Di, LUO Peng, ZENG Zhifang, LIANG Enyun, PENG Yunyi, JIA Pengyuan, XIONG Miao, ZOU Guangjun

湖南省地质调查所, 湖南 长沙 410116
Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, Hunan, China

Petrogenesis and implications of the Dupangling compound granite in southern Hunan Province, China: Constraints from mineralogical chemistry, zircon U-Pb age, geochemistry and Nd-Hf isotope

Abstract: In this paper, zircon SHRIMP U-Pb geochronology, petrology, mineral chemistry, petrogeochemistry, Sm-Nd and Lu-Hf isotopes were studied for the eastern part of the Dupangling pluton, which is located at the western section of Nanling at the junction of Hunan and Guangxi provinces. The zircon SHRIMP U-Pb dating results show that the age of coarse-to-medium-grained porphyritic biotite monzogranite is 215.6 ± 2.1 Ma, medium-grained porphyritic biotite monzogranite 220.5 ± 1.8 Ma, medium-grained rapakivi biotite monzogranite 222.8 ± 1.5 Ma. Combined with the age of fine-grained muscovite monzogranite as 209.7 ± 3.1 Ma obtained in the previous research, it is suggested that the emplacement time ranges from 222.8 Ma to 209.7 Ma, and the pluton is derived from the Indosinian magmatic activity rather than the Yanshanian as previously thought. The mineral-chemical characteristics of rapakivi K-feldspar and biotite phenocryst indicate that the magma temperature, pressure and composition have gone through fluctuation during the formation process, and biotite phenocryst was formed by multiple melting under the underplating by basaltic magma in this area. The Dupangling biotite monzogranites have higher contents of SiO_2 and $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, A/CNK value ranges between 1.02 and 1.39 and Rittman index (δ) between 0.93 and 2.18, belonging to the peraluminous calc-alkaline. Moreover, these monzogranites are enriched in REE, Rb, Th and U with higher content of HFSE (Nb, Y and Ga), depleted in Ba, Sr and Eu with higher ratios of TFeO/MgO and Ga/Al , showing the characteristics of A-type granite. The isotope $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ value ranges from -8.74 to -8.13 , and the $T_{2\text{DM}}$ value from 1.71 to 1.66 Ga; the zircon isotope $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value ranges from -14.1 to -1.4 , and the $T_{2\text{DM}}$ value from 2.14 to 1.34 Ga. It reveals that the Dupangling biotite monzogranites mainly originated from the partial melting of ancient crustal materials and were mixed with a certain degree of depleted mantle materials. The metamorphic peak period of the Indosinian movement is from 258 Ma to 243 Ma. South China was in an extensional tectonic setting after 233 Ma and mantle-derived basalt magma was in a wide range of underplating, which caused the crustal material remelting to form the Dupangling Indosinian aluminous A-type granite (rapakivi granite) under an extensional background.

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160032-17); 湖南省青年基金项目 (2018JJ3269)

This research is financially supported by the China Geological Survey (Grant DD20160032-17) and the Fund for Young Scholars of Hunan Province (Grant 2018JJ3269)

第一作者简介: 陈迪 (1985—), 男, 高级工程师, 主要从事岩石学、矿物学、矿床学研究. E-mail: 542309852@qq.com

通讯作者: 曾志方 (1968—), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事地质矿产勘查工作. E-mail: zengzhifanghn@163.com

收稿日期: 2022-05-31; **修回日期:** 2022-07-23; **责任编辑:** 王婧

Keywords: Dupangling pluton; rapakiwi granite; SHRIMP U-Pb age; mineral chemistry; A-type granite; extensional setting

摘要: 文章对位于南岭西段湘桂交界处的都庞岭东侧岩体开展了锆石 SHRIMP U-Pb 年代学、岩石学、矿物化学、岩石地球化学和 Sm-Nd、Lu-Hf 同位素分析研究。锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果显示,粗中粒斑状黑云母二长花岗岩年龄为 215.6 ± 2.1 Ma,中粒斑状黑云母二长花岗岩年龄为 220.5 ± 1.8 Ma,中粒环斑黑云母二长花岗岩年龄为 222.8 ± 1.5 Ma,结合以往研究获得的细粒白云母二长花岗岩年龄 209.7 ± 3.1 Ma,认为岩体侵位时限介于 $222.8 \sim 209.7$ Ma,为印支期岩浆活动产物,非以往认为的燕山期。环斑钾长石、黑云母聚晶的矿物化学特征表明环斑黑云母二长花岗岩形成过程中岩浆温度、压力、成分发生震荡变化,在玄武质岩浆的底侵作用下发生多次熔融作用形成黑云母聚晶。都庞岭黑云母二长花岗岩具有较高的 SiO_2 和 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量, A/CNK 值为 $1.02 \sim 1.39$,里特曼指数 (δ) 为 $0.93 \sim 2.18$,属过铝质钙碱性系列;微量元素地球化学性质表现为富集 REE、Rb、Th 和 U 及较高的 HFSE (Nb、Y 和 Ga),亏损 Ba、Sr、Eu,具有高的 TFeO/MgO 、 Ga/Al 比值,地球化学特征显示为 A 型花岗岩;Nd 同位素 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-8.74 \sim -8.13$, $T_{2\text{DM}}$ 值为 $1.71 \sim 1.66$ Ga;锆石 Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-14.1 \sim -1.4$, $T_{2\text{DM}}$ 值为 $2.14 \sim 1.34$ Ga,显示都庞岭黑云母二长花岗岩主要源于古老地壳物质的部分熔融,并受到了一定程度的亏损地幔物质的混染。印支运动的变质峰期在 $258 \sim 243$ Ma, 233 Ma 以后华南地区处于伸展的构造背景并受到幔源玄武质岩浆大范围底侵,诱发地壳物质重熔形成伸展背景下的都庞岭印支期铝质 A 型(环斑)花岗岩。

关键词: 都庞岭岩体; 环斑花岗岩; SHRIMP U-Pb 年龄; 矿物化学; A 型花岗岩; 伸展背景

中图分类号: P588 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 04-0617-25

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021146

0 引言

都庞岭岩体位于南岭西段湘桂交界的江永县、道县及广西灌阳县境内,面积约 270 km^2 。据近年来获得的同位素年龄值及花岗岩间接触关系,都庞岭岩体主体于印支期侵位,为加里东期、印支期花岗岩组成的复式岩体,岩体中发育有少量的燕山期岩株。都庞岭岩体的构造位置处于扬子地块与华夏地块拼合带,且在东西向南岭成矿带和北东向钦杭成矿带的交汇部位,其特殊的大地构造位置以及长期以来经历多期次复杂的构造-岩浆活动,导致区内巨量金属堆积,形成一系列的 W-Sn-Cu-Pb-Zn 多金属矿床(毛景文等, 2007; 刘晓菲等, 2012; 袁顺达和王旭东, 2012, 2013)。邹先武等(2009)认为都庞岭地区与岩浆作用密切相关的矿床形成于印支期。区域上,都庞岭-铜山岭-九嶷山地区是华南重要的成矿区带,岩浆作用与成矿一直以来备受地质工作者瞩目(解惠等, 2009; 雷天赐等, 2012; 李晓峰等, 2012; 符金豪等, 2018)。

以往研究将都庞岭复式花岗岩体分为西体、中体和东体三部分(陈希清等, 2008),分别为加

里东期、印支期、燕山期花岗岩,并开展了该地区岩浆源区及结晶基底钨同位素示踪研究(彭学军等, 2005; 陈希清等, 2008)。尤为引人注目的是,都庞岭复式花岗岩体部分印支期花岗岩中发育环斑钾长石,为环斑花岗岩(解广轰, 2005)。环斑花岗岩中钾长石多呈卵球状,部分钾长石卵球具斜长石外环,存在两个世代的钾长石和石英(徐德明等, 2017)。王晓霞等(2001)认为环斑花岗岩可出现在太古代到显生宙的各个地质时期和造山带中。杨进辉等(2005)、周滨等(2008)和张丽娟等(2011)对环斑花岗岩产出构造背景的研究认为其多形成于大陆裂解、造山后伸展或超大陆的裂解背景下,其产出的构造属性并不唯一。解广轰(2005)从全球环斑花岗岩的时空分布来看,认为它们主要出现在中、新元古代,是地球演化历史中罕有的具时空性和突发性的岩浆活动实例,并与某些超大型矿床有内在联系。华南地区鲜有环斑花岗岩的报道,文章通过详细的野外地质调查和岩石矿物组成分析,证实了都庞岭岩体中局部发育环斑花岗岩。

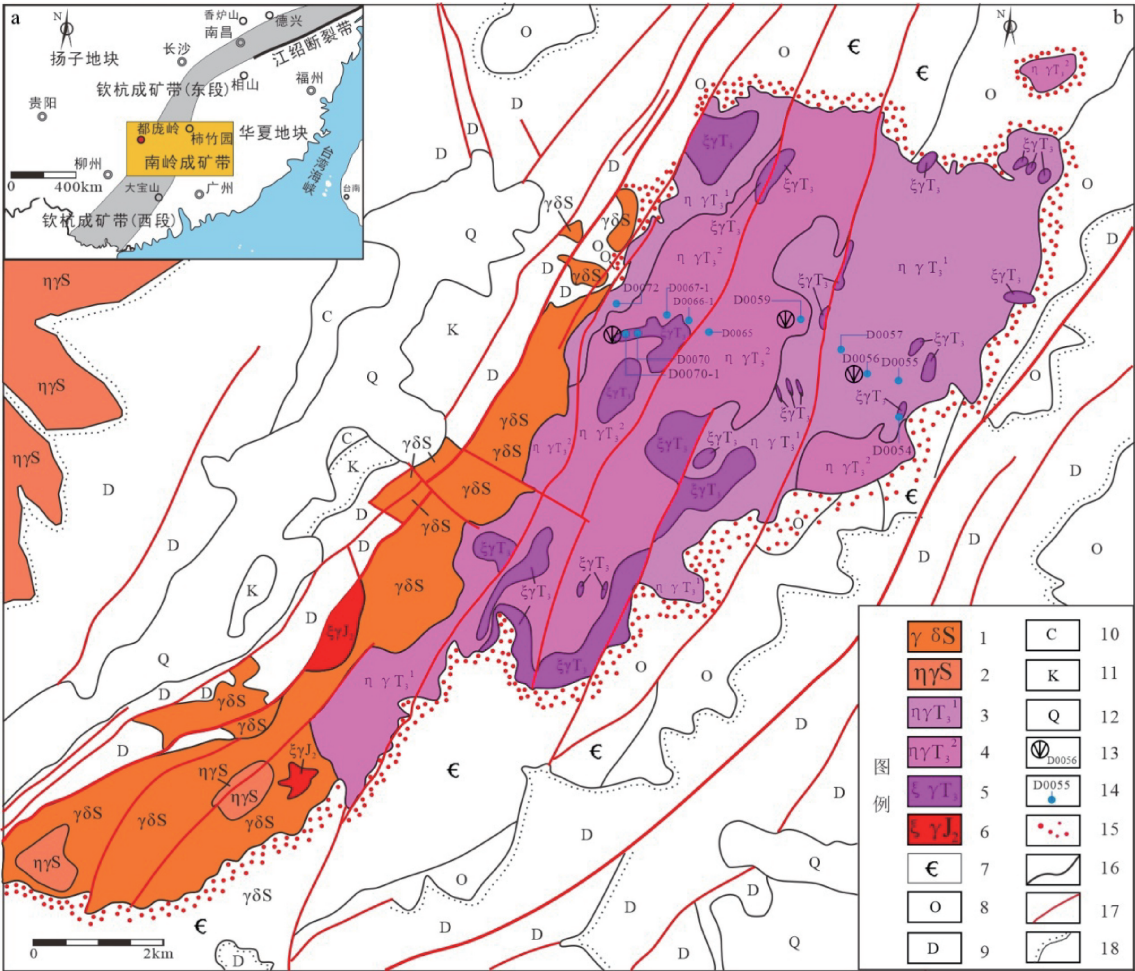
从区域上来看,华南少有环斑花岗岩出露,其成因、形成背景及岩浆成矿作用研究较弱。笔者在该地区地质填图中,针对各类岩石分布、岩

石组合,并结合主、微量元素、矿物化学、同位素年代学、Nd-Hf 同位素特征对都庞岭印支期环斑花岗岩成因、成矿进行探讨,以期深入了解该时期环斑花岗岩形成的地质意义及成矿潜力。

1 岩体地质及岩石学特征

都庞岭岩体处于扬子地块与华夏地块拼合带,且在东西向南岭成矿带和北东向钦杭成矿带的交汇部位(图 1a),文章讨论的都庞岭花岗岩为岩体东

侧部分(图 1b),分布在上木源冲-杉木顶一带,位于江永县千家峒瑶族自治县、广西灌阳县行政区域内。岩体侵入寒武纪、奥陶纪地层,所侵入的围岩均发生较强的角岩化、大理岩化等热接触变质。文章主要讨论的都庞岭岩体东侧发育有粗中粒斑状黑云母二长花岗岩,中粒斑状黑云母二长花岗岩,中粒环斑黑云母二长花岗岩(环斑花岗岩为局部发育)及二云母二长花岗岩、花岗伟晶岩脉和石英脉(徐德明等, 2017)。在岩体内断裂带附近、岩体边部见白云母化、云英岩化、钠长石化等蚀变。



1—志留纪花岗闪长岩; 2—志留纪二长花岗岩; 3—印支期粗中粒斑状黑云母二长花岗岩; 4—印支期中粒斑状黑云母二长花岗岩; 5—印支期中粒环斑黑云母花岗岩; 6—燕山期中粒斑状黑云母二长花岗岩; 7—寒武系; 8—奥陶系; 9—泥盆系; 10—石炭系; 11—白垩系; 12—第四系; 13—同位素年龄点 (D0056、D0059 和 D0070-1); 14—样品采样位置; 15—角岩化带; 16—地质界线; 17—断裂; 18—角度不整合界线

a—都庞岭岩体大地构造位置; b—都庞岭岩体地质简图

图 1 湘南都庞岭岩体所处大地构造位置及都庞岭岩体地质简图 (据徐德明等, 2017 修改)

Fig. 1 Tectonic position and geological sketch of the Dupangling pluton in the south of Hunan (modified from Xu et al., 2017)

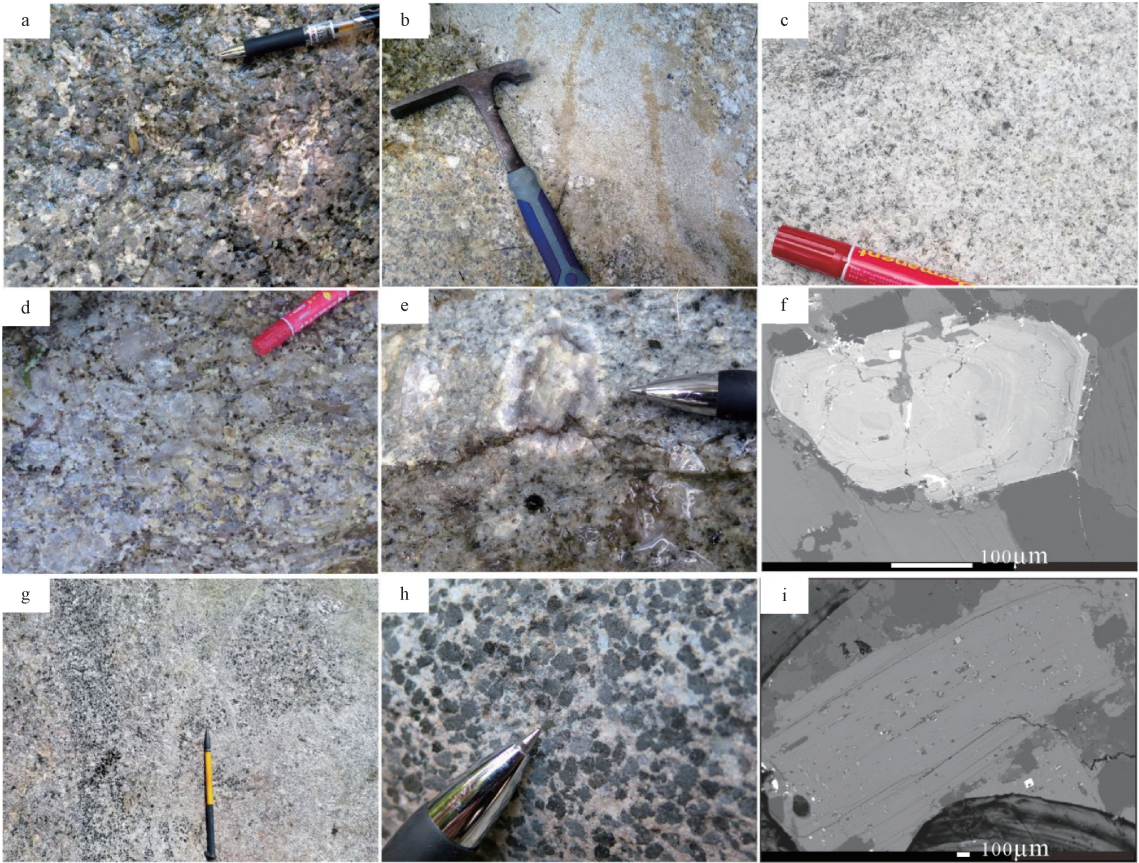
(a) Tectonic position; (b) Geological sketch

1—Silurian granodiorite; 2—Silurian monzogranite; 3—Indosinian coarse-to-medium-grained porphyritic biotite monzogranite; 4—Indosinian medium-grained porphyritic biotite monzogranite; 5—Indosinian medium-grained rapakivi biotite syenogranite; 6—Yanshanian medium-grained porphyritic biotite monzogranite; 7—Cambrian system; 8—Ordovician system; 9—Devonian system; 10—Carboniferous system; 11—Cretaceous system; 12—Quaternary system; 13—Sample locations for isotopic age analysis (D0056, D0059, and D0070-1); 14—Sample locations; 15—Hornfelsic zones; 16—Geologic boundary; 17—Fracture; 18—Angular unconformity boundary

粗中粒斑状黑云母二长花岗岩呈灰白色、少部分为肉红色，似斑状结构、块状构造；斑晶含量 10%~25%（图 2a），大小一般为 1~4 cm，成分为钾长石、斜长石、石英，长石斑晶呈半自形板状，钾长石具卡纳复合双晶，石英呈粒状；基质矿物主要为钾长石（32%~35%）、斜长石（28%~33%）、石英（30%~36%）、黑云母（2%~3%），长石自形程度较好，呈半自形板状，石英呈他形粒状，黑云母呈片状，矿物粒径主要在 2~4 mm 之间，部分大于 5 mm；副矿物常见有磷灰石、黄铁矿、锆

石、钛铁矿等。

中粒斑状黑云母二长花岗岩呈灰白色，似斑状结构、块状构造，与粗中粒斑状黑云母二长花岗岩接触界线清楚，呈脉动接触（图 2b）；斑晶含量 5%~10%，大小 2~4 cm，成分为钾长石、斜长石；基质矿物为钾长石（30%~35%）、斜长石（25%~30%）、石英（33%~38%）、黑云母（2%~3%）、白云母（1%~2%）等，局部岩石中黑云母含量较低，云母以白云母为主（图 2c）；副矿物常见有锆石、磷灰石、磁铁矿等；次生蚀变常见有绢云母化、绿泥石化等。



a—灰白色粗中粒斑状黑云母二长花岗岩（斑晶含量约 15%）；b—中粒斑状黑云母二长花岗岩与粗中粒斑状黑云母二长花岗岩呈脉动接触；c—中粒斑状黑云母二长花岗岩（黑云母含量较低）；d—灰白色中粒环斑黑云母二长花岗岩中环斑晶含量约 20%（钾长石环斑呈卵球状）；e—中粒环斑黑云母二长花岗岩中发育的环斑钾长石见斜长石环边；f—中粒环斑黑云母二长花岗岩中钾长石见震荡环带（背散射图像）；g—粗中粒斑状黑云母二长花岗岩中见黑云母斑晶集合体；h—粗中粒斑状黑云母二长花岗岩中见黑云母斑晶呈不均匀特征（局部含量达 45%）；i—黑云母斑晶中见石英、绢云母等细小矿物（背散射图像）

图 2 都庞岭黑云母二长花岗岩、黑云母斑晶集合体岩石学特征

Fig. 2 Petrological characteristics of the Dupangling biotite monzogranite and biotite phenocryst aggregate

(a) Gray-white coarse-to-medium-grained porphyritic biotite monzogranite (Phenocryst content is about 15%); (b) Pulsating contact between medium-grained porphyritic biotite monzogranite and coarse-to-medium-grained porphyritic biotite monzogranite; (c) Characteristics of medium-grained porphyritic biotite monzogranite (Biotite content is low); (d) Phenocryst content is about 20% in gray-white medium-grained rapakivi biotite monzogranite (The rapakivi texture of potassium feldspar is ovoid); (e) Rapakivi potassium feldspar with medium-grained marginal ring plagioclase developed in the medium-grained rapakivi biotite monzogranite; (f) Back-scattered electron image of potassium feldspar with oscillatory zoning in the medium-grained rapakivi biotite monzogranite; (g) Biotite phenocryst aggregates in coarse-to-medium-grained porphyritic biotite monzogranite; (h) Biotite phenocryst with heterogeneous characteristics in coarse-to-medium-grained porphyritic biotite monzogranite (Local content is up to 45%); (i) Back-scattered electron image of fine minerals such as quartz and sericite in biotite phenocryst

中粒环斑黑云母二长花岗岩 (局部发育; 图 2d) 中的环斑矿物主要为钾长石, 呈环状结构, 多呈浅肉红色, 环斑晶含量 5%~20%, 环边为 2~4 mm 宽 (图 2e), 斑晶自形程度较差, 多呈卵球状, 不均匀分布, 有局部聚集出现的特点。环斑晶发育震荡环带结构 (图 2f), 环斑中钾长石和斜长石接触边界呈参差状, 环带中见包裹不同世代的钾长石和石英。An 值分析显示其 An 值为 20~24, 为奥长石, 故岩石可称奥长环斑花岗岩。环状斑晶的中心常有斜长石聚晶核, 核外侧偶有薄的石英壳, 可能是微斜微纹长石与斜长石的反应产

物。环斑花岗岩中先晶出的斜长石常被粗大的微斜微纹长石包裹、熔融交代而呈残晶状, 后晶出的斜长石晶形完好, 故环斑中斜长石为多个世代形成。

粗中粒斑状黑云母二长花岗岩和中粒斑状 (环斑) 黑云母二长花岗岩的矿物组成总体上相似, 主要矿物和副矿物组成见表 1, 中粒斑状 (环斑) 黑二母二长花岗岩中石英含量略高, 钾长石、黑云母含量略低, 矿物总体组成上的差异可能是中粒斑状 (环斑) 黑云母二长花岗岩中长石斑晶分布不均匀以及局部多见白云母造成。

表 1 都庞岭花岗岩主要造岩矿物含量及副矿物含量表 (%)

类型/矿物		石英	钾长石	斜长石	黑云母	磁铁矿	磷灰石
粗中粒斑状黑云母二长花岗岩		30~36	32~35	28~33	2~3	1~3	<1
	均值	33	34	31	3	2	
中粒斑状 (环斑) 黑云母二长花岗岩		33~38	30~35	25~30	2~3	1~3	<1
	均值	35	33	27	2	2	

值得关注的是, 都庞岭粗中粒斑状黑云母二长花岗岩中见有黑云母斑晶集合体 (图 2g、2h), 黑云母背散射图像显示为自形晶 (图 2i), 该类集合体与花岗岩呈渐变过渡关系, 从黑云母集合体中心部位到边部黑云母含量逐渐减少, 集合体多呈块状、条带状展布。黑云母斑晶结合体大小 3~4 mm, 中心部位含量高达 45%, 呈不规则状分布在花岗岩中。

2 测试分析方法

2.1 电子探针矿物成分分析

将都庞岭黑云母二长花岗岩磨成光薄片进行背散射图像观察以及电子探针成分分析。矿物化学成分分析和背散射电子图像观察在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室利用 JEOL JXA8100M 电子探针完成。仪器工作条件为: 加速电压 15 kV, 加速电流 20 nA, 束斑直径 1~2 μm, 所有测试数据均以 ZAF 程序进行了矫正处理, 元素的特征峰测量时间为 10 s, 背景测量时间为 5 s。

2.2 锆石 SHRIMP 测年方法

开展锆石 SHRIMP 测年的样品采自不同的侵入体, 为风化程度较弱、无污染的新鲜岩石。样品靶表面喷上一层金, 进行抛光处理后露出锆石颗粒, 制成供测试用的样品靶。样品的阴极发光图像、透射光和反射光图像在北京离子探针中心电镜室完成。SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素测年在中国地质科学院北京离子探针中心利用 SHRIMP-II 仪器完成。采集的数据应用锆石 TEMORA (417 Ma) 进行校正, 应用

SL13 标定样品的 U、Th 和 Pb 的质量分数, 数据处理应用 Ludwig SQUID1.0 和 ISOPLOT 程序完成。详细的分析流程和原理见 Williams and Claesson (1987)、宋彪等 (2002)。所采用的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄具有 95% 的置信度。

2.3 主量、微量、稀土元素及同位素测试方法

岩石主量元素、稀土元素、微量元素分析, 先将样品破碎至 74 μm 后挑选 50 g 作为备测试样, 样品测试在澳实分析检测 (广州) 有限公司完成, 其中主量元素采用四硼酸锂熔片-XRF 分析法在 X 荧光光谱仪上完成 (FeO 用硫酸-氢氟酸溶矿-重铬酸钾滴定法测定); 微量元素采用四酸溶矿-ICP-MS 分析法, 在质谱仪 Thermoelemental X7 上完成; 稀土元素采用过氧化钠融熔-ICP-MS 分析法, 在 Thermoelemental X7 上完成。全岩 Nd 同位素分析在武汉地质调查中心同位素研究室检测完成, 精度¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 优于 0.5%。锆石 Lu-Hf 同位素原位分析在中国地质科学院矿产资源研究所成矿作用与资源评价重点实验室完成, 采用仪器为 Newptune 多接收等离子质谱仪和 NewWave UP123 紫外激光剥蚀系统 (LA-ICP-MS), 实验中以 He 为剥蚀物质载气, GJ-1 为锆石国际标样, Plešovice 为参考物质。

3 矿物化学特征

都庞岭斑状黑云母二长花岗岩黑云母化学组成、斑状 (环斑) 黑云母二长花岗岩钾长石化学组成的电子探针分析结果见表 2—表 4。

表 2 都庞岭斑状黑云母-长花岗岩黑云母化学组成电子探针分析结果

Table 2 Electron probe analysis results of the biotite chemical composition of the Dupangling porphyritic biotite monzogranite

样品号	D0066-1-1														D0066-1-1													
	黑云母斑晶 1							黑云母斑晶 2							黑云母基质 1							黑云母基质 2						
位置	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
单位: %																												
SiO ₂	37.19	37.65	37.4	36.92	37.14	37.00	37.67	37.49	37.70	37.51	37.45	38.01	37.69	37.75	37.84	36.98	37.34	37.6	37.87	37.49	37.92	37.52	37.49	37.55	37.21			
TiO ₂	3.68	3.05	3.47	4.09	4.59	4.27	3.26	2.44	3.35	3.56	4.08	3.07	3.41	4.31	2.89	2.77	3.63	4.26	4.08	3.58	2.90	4.09	3.49	4.08	4.61			
Al ₂ O ₃	13.97	14.51	14.20	13.54	13.56	13.69	14.03	14.69	13.88	13.92	13.62	14.22	13.74	13.53	14.45	13.69	13.66	13.31	13.47	13.95	14.64	13.84	14.26	13.97	13.65			
TFeO	22.27	22.37	22.95	22.68	22.91	22.46	22.35	22.29	23.36	23.45	23.41	22.94	23.04	23.28	23.70	22.57	23.48	23.08	22.84	22.96	23.10	22.84	22.81	23.09	22.87			
MnO	0.32	0.31	0.35	0.24	0.32	0.35	0.37	0.22	0.28	0.34	0.33	0.30	0.35	0.35	0.38	0.46	0.28	0.35	0.27	0.31	0.32	0.37	0.41	0.37	0.35			
MgO	4.50	4.74	4.70	4.29	4.27	4.22	4.62	4.75	4.55	4.27	4.26	4.80	4.64	4.39	4.47	4.88	4.66	4.47	4.53	4.67	4.51	4.40	4.54	4.36	4.11			
CaO	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.05	0.08	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.01			
K ₂ O	11.44	11.61	11.51	11.39	11.31	11.44	11.75	11.66	11.61	11.60	11.61	11.64	11.68	11.30	11.49	11.50	11.65	11.60	11.65	11.73	11.71	11.70	11.69	11.67	11.53			
Cl	0.09	0.09	0.10	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08	0.10	0.09	0.09	0.05	0.09	0.06	0.10			
F	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.10	0.19	0.00	0.00	0.16	0.06	0.00	0.00	0.09	0.06	0.00	0.12	0.08	0.03	0.01	0.03	0.00	0.00			
以 23 个氧原子计算的阳离子数																												
Si	5.95	5.96	5.92	5.94	5.91	5.93	5.99	5.98	5.97	5.95	5.94	5.98	5.98	5.98	5.96	5.97	5.92	5.96	5.99	5.94	5.96	5.93	5.93	5.92	5.91			
Al ^{IV}	2.05	2.04	2.08	2.06	2.09	2.07	2.01	2.02	2.03	2.05	2.06	2.02	2.02	2.04	2.04	2.03	2.08	2.04	2.01	2.06	2.04	2.07	2.07	2.08	2.09			
Al ^{VI}	0.58	0.67	0.57	0.51	0.46	0.51	0.61	0.74	0.56	0.55	0.48	0.62	0.54	0.47	0.64	0.57	0.48	0.44	0.49	0.54	0.68	0.51	0.59	0.52	0.47			
Ti	0.44	0.36	0.41	0.49	0.55	0.51	0.39	0.29	0.4	0.42	0.49	0.36	0.41	0.51	0.34	0.34	0.43	0.51	0.48	0.43	0.34	0.49	0.42	0.48	0.55			
Fe ²⁺	2.53	2.41	2.47	2.63	2.74	2.64	2.41	2.31	2.51	2.56	2.61	2.44	2.45	2.77	2.52	2.27	2.43	2.6	2.60	2.42	2.45	2.54	2.44	2.57	2.70			
Fe ³⁺	0.45	0.55	0.57	0.42	0.31	0.37	0.57	0.66	0.59	0.55	0.50	0.58	0.60	0.31	0.60	0.78	0.69	0.46	0.42	0.62	0.59	0.48	0.58	0.48	0.35			
Mn	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.05	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05			
Mg	1.07	1.12	1.11	1.03	1.01	1.01	1.09	1.13	1.07	1.01	1.01	1.13	1.10	1.03	1.05	1.17	1.10	1.06	1.07	1.10	1.06	1.04	1.07	1.03	0.97			
Ca	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00			
K	2.33	2.34	2.32	2.34	2.30	2.34	2.38	2.37	2.35	2.35	2.35	2.34	2.36	2.27	2.31	2.37	2.36	2.35	2.35	2.37	2.35	2.36	2.36	2.35	2.34			
Cl	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03			
F	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.05	0.10	0.00	0.00	0.08	0.03	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.06	0.04	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00			
OH	3.98	3.92	3.97	3.98	3.98	3.98	3.90	3.93	3.88	3.98	3.98	3.9	3.95	3.98	3.98	3.93	3.95	3.98	3.91	3.94	3.96	3.98	3.96	3.98	3.97			
TFe/(TFe+Mg)	0.74	0.73	0.73	0.75	0.75	0.75	0.73	0.72	0.74	0.75	0.76	0.73	0.74	0.75	0.75	0.72	0.74	0.74	0.74	0.73	0.74	0.74	0.74	0.75	0.76			
Fe ³⁺ /TFe	0.15	0.19	0.19	0.14	0.10	0.12	0.19	0.22	0.19	0.18	0.16	0.19	0.20	0.10	0.19	0.26	0.22	0.15	0.14	0.20	0.19	0.16	0.19	0.16	0.11			
Mg/(Mg+Fe)	0.26	0.27	0.27	0.25	0.25	0.25	0.27	0.28	0.26	0.25	0.24	0.27	0.26	0.25	0.25	0.28	0.26	0.26	0.26	0.27	0.26	0.26	0.26	0.25	0.24			

表 3 都庞岭环斑黑云母二长花岗岩钾长石化学组成电子探针分析结果

Table 3 Electron probe analysis results of the chemical composition of potassium feldspar in the Dupangling rapakivi biotite monzogranite

样品号		D0072																	
位置		钾长石: 斑晶																	
点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
单位: %																			
SiO ₂	64.37	64.66	64.62	64.49	65.26	64.43	64.96	65.11	65.00	64.36	64.08	65.00	65.15	64.74	64.56	65.11	65.10	64.73	64.95
TiO ₂	0.03	0.05	0.04	0.02	0.00	0.04	0.04	0.00	0.03	0.04	0.08	0.05	0.00	0.03	0.02	0.00	0.06	0.01	0.00
Al ₂ O ₃	18.15	18.28	18.19	18.20	18.09	18.10	18.27	18.19	18.14	17.96	18.17	18.19	18.45	18.40	18.17	18.15	18.21	17.83	18.12
FeO	0.07	0.07	0.10	0.06	0.05	0.06	0.05	0.09	0.10	0.05	0.05	0.09	0.07	0.09	0.08	0.08	0.08	0.04	0.00
MnO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
CaO	0.05	0.11	0.11	0.13	0.00	0.00	0.14	0.11	0.07	0.00	0.03	0.09	0.15	0.09	0.03	0.08	0.13	0.02	0.03
Na ₂ O	1.54	2.29	2.04	2.21	1.85	0.54	2.76	2.97	2.29	0.54	0.89	2.83	2.83	2.48	0.83	2.70	2.65	1.22	0.95
K ₂ O	14.86	13.92	14.05	14.14	14.33	16.64	12.94	12.89	13.82	16.41	15.37	13.08	12.67	13.50	16.02	13.38	13.11	15.52	15.86
BaO	0.48	0.64	0.44	0.49	0.24	0.44	0.41	0.48	0.45	0.18	0.59	0.37	0.38	0.53	0.52	0.36	0.35	0.17	0.05
总和	99.56	100.02	99.58	99.75	99.82	100.25	99.61	99.84	99.94	99.54	99.29	99.70	99.70	99.85	100.25	99.89	99.68	99.56	99.98
基于 8 个氧原子计算																			
Si	2.99	2.99	2.99	2.99	3.01	2.99	2.99	3.00	3.00	3.00	2.99	2.99	2.99	2.99	2.99	3.00	3.00	3.01	3.00
Al	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99
Ca	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Na	0.14	0.21	0.18	0.20	0.16	0.05	0.25	0.26	0.20	0.05	0.08	0.25	0.25	0.22	0.07	0.24	0.24	0.11	0.09
K	0.88	0.82	0.83	0.84	0.84	0.99	0.76	0.76	0.81	0.98	0.92	0.77	0.74	0.79	0.95	0.79	0.77	0.92	0.94
Ba	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Or	86.17	79.56	81.46	80.28	83.60	95.34	75.01	73.69	79.60	95.22	91.81	74.92	74.10	77.84	92.56	76.20	76.02	89.24	91.55
Ab	13.61	19.93	18.01	19.11	16.38	4.66	24.31	25.81	20.05	4.78	8.04	24.63	25.18	21.71	7.31	23.40	23.36	10.65	8.33
An	0.22	0.51	0.53	0.61	0.02	0.00	0.67	0.50	0.35	0.00	0.16	0.45	0.72	0.45	0.14	0.40	0.62	0.12	0.13

表 4 都庞岭环斑黑云母二长花岗岩钾长石化学组成电子探针分析结果

Table 4 Electron probe analysis results of the chemical composition of potassium feldspar in the Dupangling rapakivi biotite monzogranite

样品号	D0070-2-1											
位置	钾长石：基质矿物											
点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
单位：%												
SiO ₂	65.12	64.61	65.06	64.80	65.26	64.81	65.00	65.03	65.21	64.98	64.73	64.58
TiO ₂	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	18.07	17.96	18.13	18.04	17.95	17.89	17.84	18.12	18.01	17.90	18.00	17.91
FeO	0.03	0.01	0.06	0.03	0.09	0.00	0.00	0.02	0.01	0.03	0.06	0.04
MnO	0.00	0.01	0.01	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
MgO	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
CaO	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.50	0.51	0.54	0.55	0.45	0.48	0.39	0.37	0.46	0.36	0.44	0.35
K ₂ O	16.76	16.39	16.51	16.55	16.70	16.49	16.73	16.90	16.76	17.05	16.68	16.57
BaO	0.03	0.13	0.00	0.00	0.07	0.04	0.00	0.00	0.05	0.05	0.01	0.00
总和	100.55	99.65	100.32	100.01	100.53	99.73	99.96	100.45	100.49	100.40	99.96	99.46
基于 8 个氧原子计算												
Si	3.00	3.00	3.00	3.00	3.01	3.01	3.01	3.00	3.01	3.01	3.00	3.01
Al	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98
Na	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03
K	0.99	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.99	1.00	0.99	1.01	0.99	0.98
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Or	95.68	95.40	95.22	95.14	96.05	95.77	96.57	96.75	95.96	96.93	96.14	96.90
Ab	4.30	4.53	4.69	4.83	3.95	4.23	3.43	3.25	4.04	3.07	3.86	3.10
An	0.02	0.07	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

都庞岭环斑黑云母二长花岗岩中的钾长石有两种产出形式：环斑晶（或斑晶）和呈不规则粒状基质矿物。环斑黑云母二长花岗岩和斑状黑云母二长花岗岩基质中的钾长石为半自形至他形，粒径 2~5 mm 不等，呈环斑晶（或斑晶）产出的钾长石在环斑黑云母二长花岗岩中以卵球形为主，部分呈板状或不规则状，大小以 3~6 cm 最为常见。长石电子探针分析数据显示，斑晶中 K₂O 含量 12.67%~16.64%，Na₂O 含量 0.54%~2.97%，CaO 含量 0~0.15%；基质中长石 K₂O 含量 16.39%~17.05%，Na₂O 含量 0.35%~0.55%，CaO 含量 0~0.02%。分析结果显示，长石斑晶 K₂O 含量低于基质长石 K₂O 的含量；长石斑晶中 Na₂O 含量较高，较之基质有较大的变化范围；斑晶和基质中 CaO 含量均较低。从环斑黑云母二长花岗岩、斑状黑云母二长花岗岩的演化来看，基质中钾长石 K₂O 含量有增加的趋势，而斑晶中 Na₂O 含量变化较大且无规律，这可能是受条纹长石中斜长石片晶的影响所致，因为条纹长石中的片状嵌晶一般为钠长石，这种钠长石富 Na 而贫 Ca 和 K（赵珊茸等，2004）。

钾长石环斑的背散射图像特征显示矿物呈半自形—他形，局部可见环带结构，从钾长石边部至中心再到边部的分析数据显示，斑晶分析点位见图 3a，正长石（Or）和钠长石（Ab）呈震荡变

化趋势（图 3b），在钾长石 Or-Ab-An 分类图解中，钾长石环斑分析数据点在透长石、钠透长石区域（图 4）。一般而言，钾长石随结晶温度从高到低形成透长石→正长石→微斜长石系列（赵珊茸等，2004）。实验岩石学证明 700℃以上是稳定的钾长石（单斜的高温种属：透长石），700℃以下稳定的是三斜的低温种属（微斜长石），钾钠长石在高温范围是完全混溶的，大约在 600℃左右发生固相分离，形成钾相和钠相，即条纹长石（赵珊茸等，2004）。环斑中正长石（Or）和钠长石（Ab）呈齿状变化（图 3b）以及矿物结晶温度的不同，都反应出都庞岭环斑黑云母二长花岗岩形成过程中岩浆的成分和温度呈震荡变化。

都庞岭斑状黑云母二长花岗岩中的黑云母呈斑晶和基质产出，黑云母斑晶多为黑云母集合体（图 2i）。电子探针分析数据显示，斑晶黑云母 MgO 含量 4.22%~4.80%，Al₂O₃ 含量 13.53%~14.69%，TFeO 含量 22.27%~23.45%，Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg²⁺) 的比值为 0.63~0.67。基质黑云母 MgO 含量 4.11%~4.88%，Al₂O₃ 含量 13.31%~14.64%，TFeO 含量 22.57%~23.7%，Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg²⁺) 的比值为 0.65~0.73。按郑巧荣（1983）的计算方法，都庞岭斑状黑云母二长花岗岩中斑晶黑云母和基质黑云母的 FeO 含量分别为 17.32%~

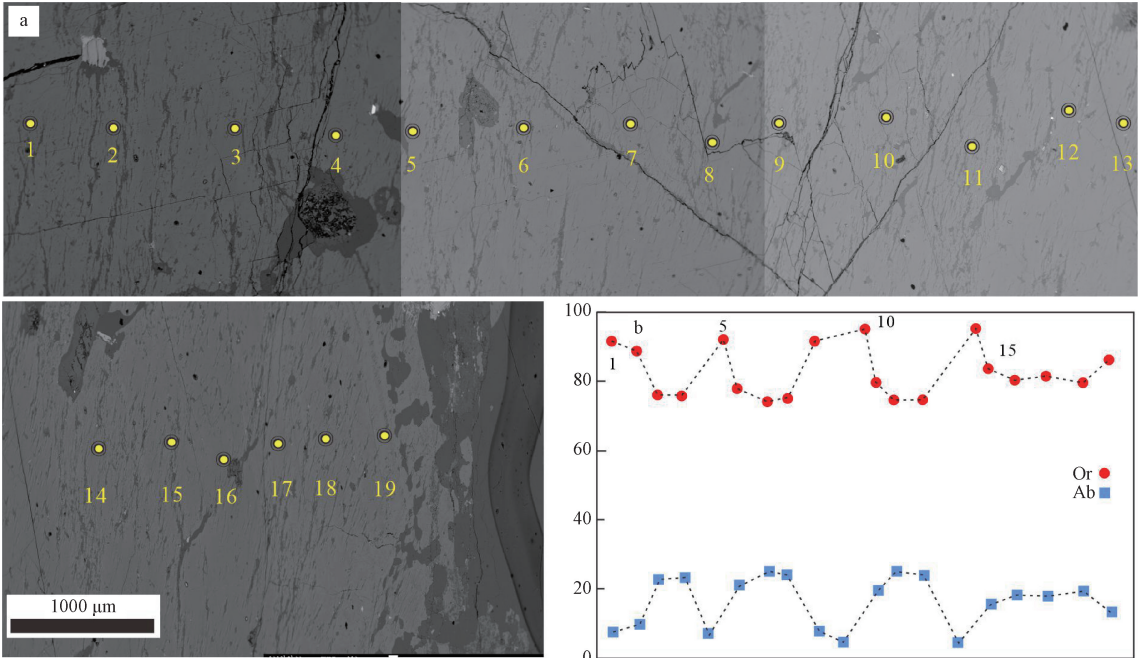


图 3 都庞岭中粒环斑黑云母二长花岗岩中钾长石成分变化图

Fig. 3 Back-scattered image and variation diagram showing the potassium feldspar composition in medium-grained rapakivi biotite monzogranites

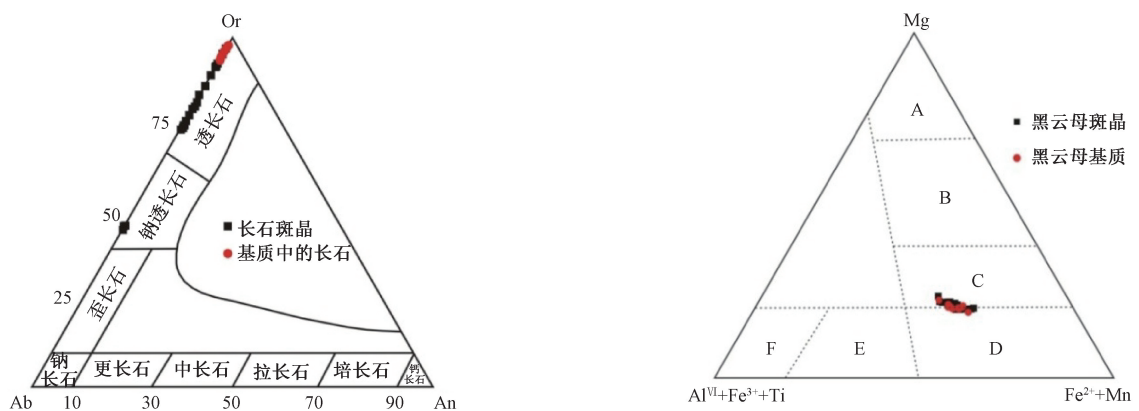


图 4 都庞岭斑状黑云母二长花岗岩中钾长石 Or-Ab-An 分类图解 (Smith, 1974)

Fig. 4 Or-Ab-An diagram for the potassium feldspar in the Dupangling porphyritic biotite monzogranite (Smith, 1974)

20.96%和 16.78%~20.27%, Fe_2O_3 含量分别为 2.58%~5.52%和 2.89%~6.43%。分析结果表明, 黑云母斑晶和基质的成分差异不大, 均表现为富铁贫镁的特征。对都庞岭斑状黑云母二长花岗岩黑云母成分进行分类, 投点在铁质黑云母、铁叶黑云母区域 (图 5), 与黑云母成分富铁特征一致。黑云母的成分中 F 含量 0~0.19%, Cl 含量 0.05%~0.13%, 以及 $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 比值较大, 表明黑云母在结晶过程中受到一定流体的改造 (郑巧荣, 1983; 陶继华等, 2015)。

A—金云母; B—镁质黑云母; C—铁质黑云母; D—铁叶黑云母; E—铁白云母; F—白云母

图 5 都庞岭斑状黑云母二长花岗岩中黑云母的成分分类图 (Foster, 1960)

Fig. 5 Diagram showing the biotite composition in the Dupangling porphyritic biotite monzogranite (Foster, 1960)
A—Phlogopite; B—Magnesian biotite; C—Ferric biotite; D—Siderophyllite; E—Ferrimuscovite; F—Muscovite

4 岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学

此次测年的锆石大部分呈柱状晶形, 粒径一般介于 60~300 μm 之间, 长宽比约为 2:1~5:1, 晶形比较完整, 裂纹不发育 (个别锆石见裂纹), 阴极发光图像显示这些锆石发育典型的岩浆型震

荡环带，年龄测定锆石特征见图 6 中附的典型锆石

阴极发光图像。

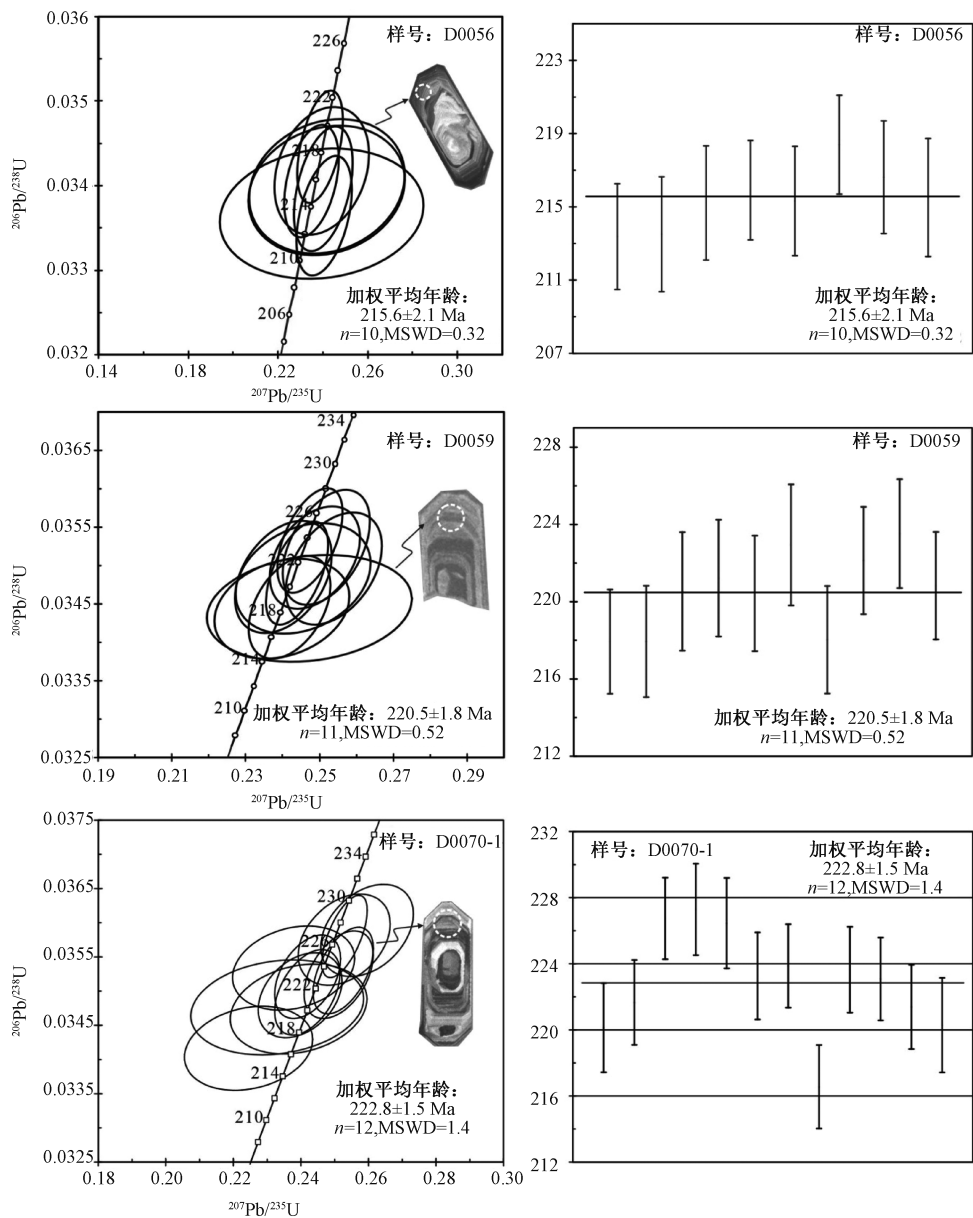


图 6 都庞岭黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordant diagrams for the Dupangling biotite monzogranite

粗中粒斑状黑云母二长花岗岩：样品 D0056 锆石 U 含量 $250\times10^{-6}\sim3259\times10^{-6}$ ，均值为 772×10^{-6} ；Th 含量 $180\times10^{-6}\sim613\times10^{-6}$ ，均值为 338×10^{-6} ；Th/U 比值 0.17~0.98 之间，均值为 0.64（表 5）。锆石具岩浆成因的震荡环带及高的 Th/U 比值（岩浆锆石 Th/U 含量一般>0.5）特征表明该样品的锆石为典型的岩浆成因锆石，所测的 U-Pb 同位素数据可靠。在样品 D0056 的 10 个测点中， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 227.9~213.4 Ma，且该 10 组年龄数据的谐和性较好（图 6），对上述 10 组单点锆石年龄加权平均

计算，得到粗中粒斑状黑云母花岗岩的结晶年龄为 $215.6\pm2.1\text{ Ma}$ ， $\text{MSWD}=0.32$ 。

中粒斑状黑云母二长花岗岩：样品 D0059 锆石 U 含量 $242\times10^{-6}\sim1582\times10^{-6}$ ，均值为 670×10^{-6} ；Th 含量 $159\times10^{-6}\sim633\times10^{-6}$ ，均值为 384×10^{-6} ；Th/U 比值 0.37~0.99 之间，均值为 0.65（表 5）。锆石具岩浆成因的震荡环带及 Th/U 比值高特征表明该样品中的锆石为典型的岩浆成因锆石，所测的 U-Pb 同位素数据可靠。在样品 D0059 的 11 个测点中， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 235.1~217.9 Ma，

表 5 都庞岭黑云母二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素分析结果

Table 5 Zircon SHRIMP U-Pb isotopic analysis results of the Dupangling biotite monzogranite

测试点	²⁰⁶ Pb _c /%	元素含量/ (μg/g)				Th/U	同位素比值						年龄/Ma				不一致性/ %
		U	Th	²⁰⁶ Pb *	²⁰⁷ Pb * / ²⁰⁶ Pb *		±/%	²⁰⁷ Pb * / ²³⁵ U	±/%	²⁰⁶ Pb * / ²³⁸ U	±/%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ		
样号：D0056 粗中粒斑状黑云母二长花岗岩																	
D0056-1	1.77	3259	544	103.0	0.17	0.0508	3.3	0.2520	3.5	0.03598	1.2	227.9	±2.8	233.0	±21.0	2	
D0056-2	0.41	338	218	9.8	0.67	0.0514	2.9	0.2387	3.2	0.03365	1.4	213.4	±2.9	209.3	±5.1	18	
D0056-3	3.01	413	258	12.3	0.65	0.0512	12.1	0.2380	12.1	0.03367	1.5	213.5	±3.1	204.0	±17.0	14	
D0056-4	2.30	361	248	10.8	0.71	0.0512	8.9	0.2400	9.1	0.03395	1.5	215.2	±3.1	196.0	±12.0	15	
D0056-5	0.41	784	379	23.0	0.50	0.0497	3.0	0.2333	3.3	0.03406	1.3	215.9	±2.7	200.4	±5.8	~20	
D0056-7	0.12	587	353	17.1	0.62	0.0509	3.1	0.2383	3.4	0.03397	1.4	215.3	±3.0	211.2	±4.9	9	
D0056-8	0.31	970	613	28.8	0.65	0.0499	2.4	0.2371	2.7	0.03446	1.3	218.4	±2.7	199.8	±4.4	~15	
D0056-9	0.24	264	180	7.8	0.70	0.0504	5.4	0.2380	5.6	0.03417	1.4	216.6	±3.1	216.5	±9.5	~1	
D0056-10	0.61	250	236	7.3	0.98	0.0512	8.9	0.2400	9.0	0.03400	1.5	215.5	±3.2	208.6	±9.1	13	
D0056-13	2.20	501	357	15.8	0.74	0.0514	8.0	0.2550	8.1	0.03597	1.6	227.8	±3.5	224.0	±11.0	12	
样号：D0059 中粒斑状黑云母二长花岗岩																	
D0059-1	2.22	1528	552	46.2	0.37	0.0502	5.0	0.2380	5.1	0.03439	1.3	217.9	±2.7	179.0	±14.0	~6	
D0059-3	2.05	642	477	19.4	0.77	0.0518	7.5	0.2460	7.6	0.03439	1.3	217.9	±2.9	164.8	±9.4	21	
D0059-4	0.28	1384	633	44.3	0.47	0.0509	1.7	0.2611	2.1	0.03714	1.2	235.1	±2.8	212.5	±4.3	2	
D0059-5	0.43	242	159	7.3	0.68	0.0497	3.4	0.2385	3.7	0.03480	1.4	220.5	±3.1	206.5	±6.0	~22	
D0059-6	0.42	353	279	10.6	0.82	0.0524	3.2	0.2525	3.5	0.03491	1.4	221.2	±3.0	215.2	±5.5	27	
D0059-7	0.18	321	199	9.6	0.64	0.0509	4.8	0.2440	5.0	0.03479	1.4	220.4	±3.0	214.8	±6.8	6	
D0059-8	0.40	531	342	16.1	0.67	0.0516	2.8	0.2503	3.2	0.03519	1.4	222.9	±3.1	157.3	±4.8	17	
D0059-10	0.23	494	298	14.6	0.62	0.0506	2.8	0.2402	3.1	0.03440	1.3	218.0	±2.8	208.2	±4.4	3	
D0059-12	0.46	781	445	23.6	0.59	0.0511	3.1	0.2472	3.3	0.03506	1.3	222.1	±2.8	204.6	±5.5	10	
D0059-13	0.11	543	520	16.5	0.99	0.0505	2.0	0.2458	2.4	0.03528	1.3	223.5	±2.8	205.4	±6.0	~2	
D0059-14	0.31	561	322	16.8	0.59	0.0504	1.9	0.2422	2.3	0.03485	1.3	220.8	±2.8	214.0	±4.1	~3	
样号：D0070-1 中粒环斑黑云母二长花岗岩																	
D0070-1-1	0.25	415	235	12.4	0.58	0.0500	5.4	0.2390	5.6	0.03474	1.2	220.1	±2.7	218.4	±8.9	~14	
D0070-1-2	0.00	523	312	15.7	0.62	0.0501	2.4	0.2419	2.6	0.03498	1.2	221.7	±2.6	219.9	±4.5	~10	
D0070-1-3	—	1179	393	36.2	0.34	0.0512	1.3	0.2529	1.7	0.03580	1.1	226.7	±2.5	222.6	±3.9	10	
D0070-1-4	0.01	324	114	9.9	0.36	0.0525	3.3	0.2596	3.5	0.03589	1.2	227.3	±2.8	213.4	±8.2	26	
D0070-1-5	0.01	345	179	10.6	0.54	0.0513	3.3	0.2528	3.6	0.03575	1.2	226.5	±2.7	220.0	±6.1	11	
D0070-1-6	—	474	721	14.3	1.57	0.0517	2.4	0.2512	2.7	0.03524	1.2	223.3	±2.6	218.8	±3.6	18	
D0070-1-7	1.28	1509	699	46.4	0.48	0.0488	4.9	0.2380	5.0	0.03534	1.1	223.9	±2.5	210.3	±9.5	~61	
D0070-1-8	0.33	626	346	18.4	0.57	0.0477	5.5	0.2250	5.6	0.03416	1.2	216.6	±2.5	209.5	±6.0	~163	
D0070-1-11	0.00	532	350	16.1	0.68	0.0519	2.0	0.2525	2.3	0.03530	1.2	223.6	±2.6	215.8	±4.8	20	
D0070-1-12	0.26	1126	477	34.2	0.44	0.0498	2.4	0.2420	2.7	0.03521	1.1	223.1	±2.5	208.8	±5.4	~19	
D0070-1-13	0.33	683	308	20.6	0.47	0.0498	3.2	0.2397	3.4	0.03494	1.2	221.4	±2.5	208.4	±6.5	~20	
D0070-1-14	1.55	494	285	15.0	0.60	0.0486	7.1	0.2330	7.2	0.03476	1.3	220.3	±2.9	205	±11.0	~70	

注: Pb_c 和 Pb^{*} 分别代表普通铅和放射成因铅; ²⁰⁶Pb_c 指普通铅中的 ²⁰⁶Pb 占全铅 ²⁰⁶Pb 的百分数。

且该 11 组年龄数据的谐和性较好（图 6），对上述 11 组单点锆石年龄加权平均计算，得到中粒斑状黑云母二长花岗岩的结晶年龄为 220.5 ± 1.8 Ma，MSWD = 0.52。

中粒环斑黑云母二长花岗岩：样品 D0070-1 锆石 U 含量 $324 \times 10^{-6} \sim 1509 \times 10^{-6}$ ，均值为 686×10^{-6} ；Th 含量 $114 \times 10^{-6} \sim 721 \times 10^{-6}$ ，均值为 368×10^{-6} ；Th/U 比值 0.34~1.57 之间，均值为 0.6（表 5）。锆石具岩浆成因的震荡环带及 Th/U 比值高特征表明该样品中的锆石为典型的岩浆成因锆石，所测的 U-Pb 同位素数据

可靠。在样品 D0070-1 的 12 个测点中， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 227.3~216.6 Ma，且该 12 组年龄数据的谐和性较好（图 6），对上述 12 组单点锆石年龄加权平均计算，得到中粒环斑黑云母二长花岗岩的结晶年龄为 222.8 ± 1.5 Ma，MSWD = 1.4。

5 花岗岩岩石地球化学特征

都庞岭黑云母二长花岗岩的主量元素、稀土元素、微量元素分析数据见表 6。

表 6 都庞岭岩体主量元素和微量元素分析结果（主量元素/%；微量、稀土元素/ $\times 10^{-6}$ ；Au/ $\times 10^{-9}$ ）

Table 6 Major and trace elements compositions of the Dupangling pluton (main elements/%, trace and REE elements/ $\times 10^{-6}$, Au/ $\times 10^{-9}$)

	D0055	D0056	D0057	D0059	D0065	D0067-1	D0070	D0070-1	D0072	D0054
	斑状黑云母二长花岗岩					环斑黑云母二长花岗岩				
SiO ₂	78.15	76.11	76.11	76.99	77.03	75.57	76.08	76.69	73.82	78.51
TiO ₂	0.11	0.13	0.12	0.04	0.17	0.08	0.11	0.09	0.25	0.08
Al ₂ O ₃	11.91	11.81	12.11	12.46	12.06	12.17	12.32	12.12	13.58	12.12
FeO	0.92	1.74	1.86	1.01	1.41	1.79	1.62	1.14	2.02	1.51
Fe ₂ O ₃	1.67	2.16	2.35	1.41	1.88	2.12	1.97	1.71	2.75	2.14
MnO	0.04	0.05	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.02
MgO	0.12	0.22	0.17	0.03	0.23	0.07	0.13	0.11	0.37	0.18
CaO	0.19	0.65	0.61	0.26	0.93	0.58	0.62	0.45	0.99	0.12
Na ₂ O	2.71	2.90	3.19	3.64	2.93	3.17	3.12	3.12	2.84	4.12
K ₂ O	4.98	4.51	4.65	4.54	4.94	5.19	5.05	4.93	5.36	1.64
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.06	0.02
烧失量	0.70	0.66	0.33	0.39	0.35	0.23	0.28	0.36	0.51	0.68
总和	101.52	100.96	101.58	100.82	102.00	101.03	101.36	100.76	102.60	101.14
ALK	7.69	7.41	7.84	8.18	7.87	8.36	8.17	8.05	8.22	5.76
FeO ^T	2.42	3.68	3.98	2.27	3.09	3.71	3.37	2.68	4.50	3.43
A/CNK	1.17	1.09	1.06	1.09	1.02	1.02	1.05	1.07	1.12	1.39
A/NK	1.21	1.22	1.18	1.14	1.18	1.12	1.16	1.15	1.29	1.42
δ	1.68	1.66	1.86	1.97	1.82	2.15	2.02	1.92	2.18	0.93
W	18.10	12.20	21.90	22.10	4.10	5.90	3.50	5.50	6.60	7.50
Sn	14.00	23.00	20.00	41.00	15.00	13.00	19.00	20.00	12.30	11.00
Mo	0.58	1.15	0.85	1.77	0.51	2.76	0.3	0.31	0.38	0.81
Bi	9.91	1.24	3.17	2.61	2.01	0.65	1.73	1.62	1.24	0.36
Cu	4.80	4.40	2.70	19.20	2.80	3.60	2.50	3.30	9.50	10.00
Pb	55.60	46.30	54.20	74.80	45.80	52.80	56.00	60.40	38.40	18.50
Zn	29.00	26.00	32.00	25.00	27.00	21.00	25.00	23.00	30.00	19.00
Sb	0.27	0.41	0.35	0.29	0.36	0.64	0.28	0.31	0.34	0.54
Cr	4.00	7.00	4.00	3.00	6.00	4.00	4.00	4.00	7.00	6.00
Ni	1.50	2.60	2.00	1.00	2.10	1.30	1.40	1.10	3.00	2.30
Co	1.30	1.50	1.40	0.50	2.00	1.00	1.20	1.00	2.90	1.30
Hg	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
V	5.00	6.00	6.00	1.00	12.00	3.00	5.00	5.00	18.00	4.00
Nb	15.80	16.60	20.90	24.50	14.30	13.40	13.90	14.00	11.60	19.20
Ta	3.73	3.71	4.56	4.25	2.87	3.01	2.82	2.72	1.71	4.78
Th	48.20	46.00	58.20	39.90	57.00	64.40	58.50	54.40	43.80	47.00
U	13.20	21.20	18.50	22.90	16.10	23.60	13.00	11.10	7.50	17.10
Zr	90.00	105.00	123.00	123.00	129.00	91.00	136.00	126.00	141.00	105.00
Hf	3.90	4.90	5.20	6.40	4.30	3.70	5.40	5.40	4.30	4.60
Rb	550.00	544.00	640.00	772.00	460.00	590.00	530.00	490.00	409.00	201.00

续表6

	D0055	D0056	D0057	D0059	D0065	D0067-1	D0070	D0070-1	D0072	D0054
	斑状黑云母二长花岗岩					环斑黑云母二长花岗岩				
Cs	19.30	30.40	44.00	39.70	22.70	31.90	35.00	30.10	24.00	11.80
Sr	13.00	16.50	13.60	2.90	33.20	6.90	21.60	23.70	53.30	47.40
Ba	58.70	58.50	54.40	8.00	151.00	10.10	77.40	63.50	409.00	87.60
Li	58.60	61.30	128.50	154.00	80.10	40.40	71.90	49.50	85.80	55.20
Be	5.41	7.61	6.07	9.36	7.28	7.99	7.56	9.15	4.08	5.71
As	60.20	7.10	0.30	4.30	0.20	2.60	3.10	5.50	1.00	35.10
Ga	18.20	17.85	19.80	20.90	17.45	18.00	18.45	17.85	17.95	17.85
Sc	5.80	5.30	6.90	5.20	5.30	5.80	4.70	4.40	5.60	6.00
Au	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Ag	0.15	0.03	0.03	0.08	0.03	0.04	0.14	0.13	0.04	0.03
F	710.00	1930.00	2060.00	1580.00	1570.00	1340.00	1280.00	1030.00	720.00	1040.00
Cl	60.00	50.00	50.00	80.00	90.00	90.00	100.00	70.00	90.00	50.00
Cd	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.70	0.06	0.06	0.02
B	5.00	5.00	7.00	7.00	10.00	18.00	5.00	5.00	8.00	16.00
La	24.80	26.50	36.40	7.10	48.50	35.20	32.40	28.40	35.70	24.90
Ce	73.80	62.70	87.30	26.80	108.50	86.30	75.90	66.80	85.90	62.80
Pr	7.25	7.71	10.35	2.57	12.25	10.75	8.92	8.29	8.37	7.34
Nd	26.30	28.10	39.40	11.60	43.40	39.60	32.90	30.40	29.70	28.30
Sm	6.76	8.02	10.71	4.82	9.79	10.75	9.16	8.08	5.91	9.05
Eu	0.11	0.18	0.15	0.05	0.34	0.12	0.21	0.17	0.56	0.26
Gd	7.68	9.46	11.70	6.46	9.37	11.05	8.73	8.47	5.07	10.35
Tb	1.49	1.82	2.32	1.66	1.75	2.22	1.59	1.61	0.93	2.45
Dy	11.15	12.61	15.31	12.22	11.45	13.71	10.55	10.50	5.78	17.20
Ho	2.57	2.63	3.43	2.91	2.43	2.96	2.26	2.26	1.22	3.74
Er	8.35	9.09	10.25	9.72	7.06	8.59	6.97	7.15	3.52	10.90
Tm	1.42	1.43	1.71	1.63	1.09	1.33	1.12	1.19	0.55	1.81
Yb	9.62	9.21	11.50	11.23	7.12	8.48	7.53	7.96	3.73	12.30
Lu	1.48	1.41	1.74	1.81	1.04	1.26	1.14	1.14	0.54	1.89
Y	80.20	80.80	99.90	90.60	66.70	79.30	66.10	72.10	34.90	111.00
ΣREE	263.00	261.60	342.10	191.10	330.80	311.60	265.50	254.50	222.40	304.30
δEu	0.05	0.06	0.04	0.03	0.11	0.03	0.07	0.06	0.31	0.08
L/H	1.12	1.04	1.17	0.38	2.06	1.42	1.51	1.26	2.95	0.77

注: DI—分异指数 (CIPW 标准矿物, %); A/CNK—铝饱和指数 ($\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$, 摩尔比); A/NK—碱度指数 ($\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{N}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$, 摩尔比); ALK—全碱含量; δ—里特曼钙碱指数; L/H—LREE/HREE

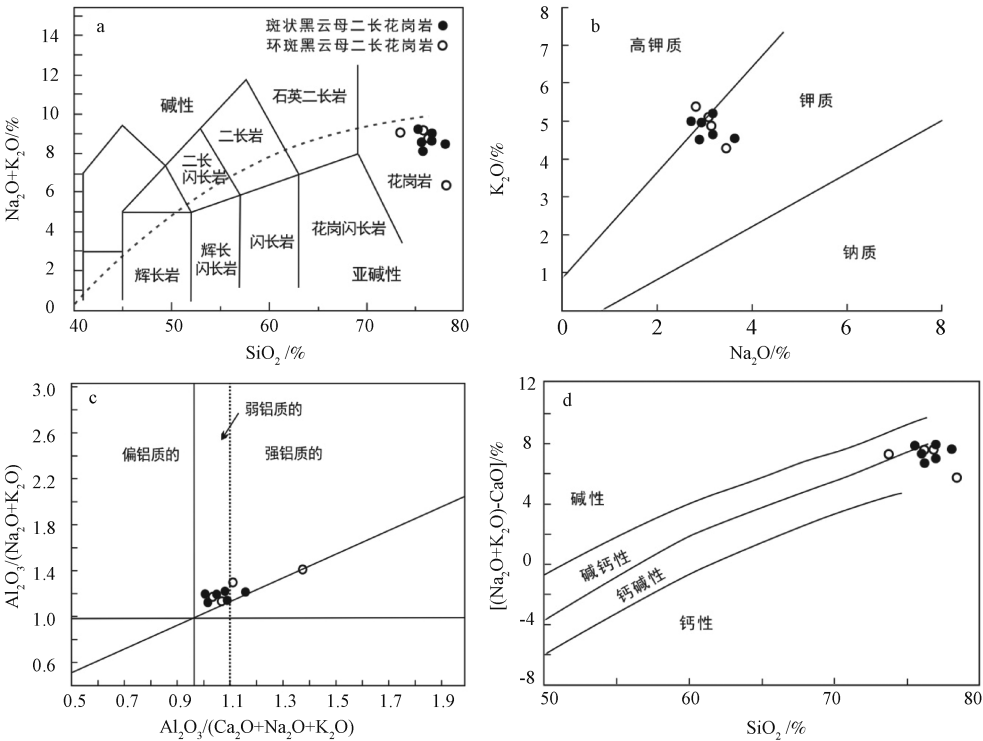
5.1 主量元素特征

都庞岭黑云母二长花岗岩的 SiO_2 含量较高, 介于 73.82%~78.51% 之间, 均值为 76.51%, 具富硅的特征; K_2O 含量 1.64%~5.36%, Na_2O 含量 2.71%~4.12%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.39~1.89, 在 SiO_2 -ALK 图解中, 投点均落在亚碱性花岗岩区域 (图 7a); 在 K_2O - Na_2O 图解中, 投点落在钾质和高钾质岩石区域 (图 7b), 表现为富钾特征; 岩石全碱 (ALK) 含量 5.76%~8.36%, 全碱较高, 为富碱的特征; 岩石的 A/CNK 值含量大部分在 1.02~1.39, 均值为 1.11, 在 A/CNK-A/NK 图解中投点落在过铝质岩石区域 (图 7c), 总体表现为强过铝的特征; 里特曼指数 δ 值为 0.93~2.18, 按里特曼指数的划分方案及图解判别显示 (图 7d), 为钙碱性岩 (钙碱性岩 $\delta<3.3$)。根据标准矿物计

算 DI 值为 87.1~94.5, 分异指数 DI 较高, 表明经历较高分化的分异演化。综上所述, 都庞岭黑云母二长花岗岩富硅、碱、钾 (高钾), 为亚碱性、过铝质的钙碱性岩石。

5.2 微量元素特征

都庞岭黑云母二长花岗岩的大离子亲石元素 Rb 含量 $201.00 \times 10^{-6} \sim 772.00 \times 10^{-6}$; Th 含量 $39.90 \times 10^{-6} \sim 64.40 \times 10^{-6}$; Ba 含量 $8.00 \times 10^{-6} \sim 409.00 \times 10^{-6}$; Sr 含量 $2.90 \times 10^{-6} \sim 53.30 \times 10^{-6}$, 在微量元素原始地幔蛛网图中表现为 Rb、Th、U 富集, Ba、Sr、P、Ti 亏损特征, 图解上显示为 Ba、Sr、Ti 低槽 (图 8a)。高场强元素 Nb 含量 $11.60 \times 10^{-6} \sim 24.50 \times 10^{-6}$; Ti 含量 $240 \times 10^{-6} \sim 1500 \times 10^{-6}$, Nb 和 Ti 在微量元素原始地幔蛛网图中出现低槽 (Nb 的亏损程度不及 Ti 明显), 表现为高场强元素

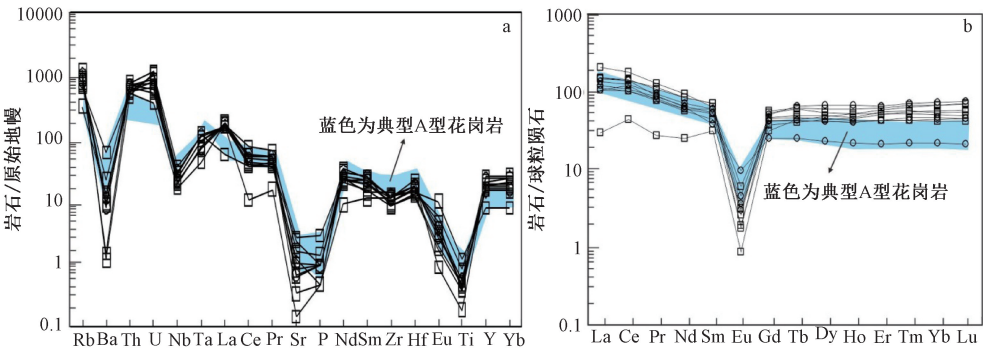


a—TAS 分类图解 (据 Cox et al. , 1979; Wilson, 1989 修改); b— $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解; c—A/CNK-A/NK 图解 (Maniar and Piccoli, 1989); d— $\text{SiO}_2 - [(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{CaO}]$ 图解 (Frost, 2001)

图 7 都庞岭黑云母二长花岗岩岩石化学图解

Fig. 7 Petrochemical diagrams for the Dupangling biotite monzogranite

(a) TAS classification diagram (Schema is modified from Cox et al. , 1979; Wilson, 1989); (b) $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ diagram; (c) A/CNK-A/NK diagram (Schema from Maniar and Piccoli, 1989); (d) $\text{SiO}_2 - [(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{CaO}]$ diagram (Schema from Frost, 2001)



a—微量元素原始地幔蛛网图; b—稀土元素球粒陨石配分模式图

图 8 都庞岭岩体微量元素原始地幔蛛网图和稀土元素球粒陨石配分模式图 (典型 A 型花岗岩的微量元素原始地幔标准化蛛网图和 REE 球粒陨石标准化图 (蓝色) 分布区域据张旗, 2012 修改; 标准化数据引自 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig. 8 Primitive mantle spider diagram for trace elements and chondrite partition pattern diagram for rare earth elements of the Dupangling pluton (Primitive mantle spider diagram of trace elements and REE chondrite standardized map (blue) of typical A-type granite are modified from Zhang, 2012; Standardized data are quoted from Sun and Mcdonough, 1989)

(a) Primitive mantle spider diagram for trace elements; (b) Chondrite partition pattern diagram for rare earth elements

亏损特征。Sr 含量 $2.90 \times 10^{-6} \sim 53.30 \times 10^{-6}$, 均值 23.21×10^{-6} ; Yb 含量 $3.73 \times 10^{-6} \sim 12.30 \times 10^{-6}$, 均值 8.87×10^{-6} ; Sr 的含量变化范围大, 但总体表现为 Sr 含量低的特征 (大陆地壳 Sr 含量为 $320 \times$

10^{-6}), 低 Sr 低 Yb 特征, 指示该花岗岩是在地壳中等厚度 (30~50 km) 下熔融形成。都庞岭黑云母二长花岗岩的 Nb* 值 ($Nb^* = 2 \times Nb_N / (K_N + La_N)$) 为 0.14~0.59, 均值为 0.26。Nb* 值小于 1, 显示 Nb 具有负异常, 但异常程度不大, 表明岩石在形成的过程中混杂了部分大陆壳物质或花岗质岩石。

微量元素丰度和大陆地壳平均值相比较, 亲石元素及部分金属成矿元素、稀有元素偏高, 表现出一定的成矿能力, 其中 W、Sn、Bi、Pb、Rb 含量分别高出大陆地壳值 3~22 倍、6~24 倍、2~55 倍、1~6 倍和 4~15 倍; 稀有金属 Li、Nb、Ta 含量分别高出大陆地壳 2~9 倍、1~3 倍和 2~6 倍。Nb、Ta、U、REE 等组分富集, 显示该地区的岩浆作用具有 W、Sn、Rb、Nb、Ta 成矿潜力 (李镇江, 2018)

5.3 稀土元素特征

都庞岭黑云母二长花岗岩稀土元素总量 ΣREE 为 $191.10 \times 10^{-6} \sim 342.10 \times 10^{-6}$, LREE 含量 $52.94 \times 10^{-6} \sim 222.78 \times 10^{-6}$, HREE 含量 $56.24 \times 10^{-6} \sim 171.64 \times 10^{-6}$, 稀土元素总量比大陆地壳稀土总量高 (大陆地壳稀土总量为 125×10^{-6})。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图中 (图 8b), 表现出微右倾和平坦“海鸥型”配分模式, 该配分模式与 LREE/HREE 值在 0.38~2.95, 均值为 1.37 的特征一致。(La/Yb)_N 值在 0.45~6.87 之间, 均值为 2.85, 数值较小, 其轻重稀土分异不明显。 δEu 值为 0.03~0.31, 均小于 1 且较低, 其值表现出负异常, 在配分模式图中呈“V”型分布, 这种特征表明在岩浆分离结晶过程中, 斜长石的大量晶出将导致残余熔体中形成明显负异常。

5.4 Nd、Hf 同位素特征

都庞岭岩体 Nd 同位素分析数据见表 7, 其初始比值、 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值以及 Nd 的模式年龄根据样品对应的年龄计算, 样品 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值为 0.1224~0.2671, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值为 0.512102~0.512323, $\varepsilon_{Nd}(t) = -8.74 \sim -8.13$, 两阶段 Nd 模式年龄 $T_{2DM} = 1.71 \sim 1.66$ Ga, Nd 同位素 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值较低, 显示花岗岩为壳源物质重熔的特征。

锆石 Hf 同位素分析以 GJ-1 为标样, 获得标样的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值为 0.000238~0.000240, 均值 0.000238; $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.282014~0.282028, 均值 0.282022, 与侯可军等 (2011) 报道的标准样品 GJ1 的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 和 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 分析数据 0.00028±2、0.282008±25 基本一致。

表 7 都庞岭花岗岩体岩石样品的 Sm-Nd 同位素组成

Table 7 Sm-Nd isotopic compositions of the Dupangling granite samples

样号	$\frac{Sm}{Nd} \times 10^{-6}$		$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$\varepsilon_{Nd}(t)$	T_{2DM}/Ga
D0056	9.476	31.92	0.1796	0.512166±3	-8.74	1.71
D0059	4.376	9.913	0.2671	0.512323±6	-8.13	1.66
D0070	7.289	29.58	0.1491	0.512145±4	-8.27	1.67
D0072	6.216	30.72	0.1224	0.512102±4	-8.35	1.68

分析斑状黑云母二长花岗岩 (样号 D0056) 13 颗锆石 (其加权平均年龄为 215.6 ± 2.1 Ma) 的 $^{176}Yb/^{177}Hf$ 和 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值分别为 0.017312~0.034811 和 0.000626~0.001262 (表 8), 其 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值小于 0.002, 表明这些锆石在形成以后, 仅具有较少的放射性成因 Hf 积累, 因而可以用初始的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值 (吴福元等, 2007)。锆石 Lu、Hf 同位素组成方面, $f_{Lu/Hf}$ 值为 -0.98~-0.96, 低于平均地壳 $f_{Lu/Hf}$ 值 -0.55 (Griffin et al., 2007), 趋于上地壳 $f_{Lu/Hf}$ 值 -0.72 (Amelin, 1999)。计算获得 13 颗锆石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值范围 -14.1~2.2, 均值为 -5.6, 模式年龄 T_{DM} 值 1425~957 Ma, 均值 1087 Ma; T_{2DM} 值 2136~1388 Ma, 均值 1604 Ma。

分析中粒环斑黑云母二长花岗岩 (样号 D0070-1) 14 颗锆石 (其加权平均年龄为 222.8 ± 1.5 Ma) 的 $^{176}Yb/^{177}Hf$ 和 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值分别为 0.016233~0.035717 和 0.000576~0.001309 (表 8), 其 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值小于 0.002, 表明这些锆石在形成以后, 仅具有较少的放射性成因 Hf 积累, 因而可以用初始的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值 (吴福元等, 2007)。锆石 Lu、Hf 同位素组成方面, $f_{Lu/Hf}$ 值 -0.98~-0.96, 低于平均地壳 $f_{Lu/Hf}$ 值 -0.55 (Griffin et al., 2002), 趋于上地壳 $f_{Lu/Hf}$ 值 -0.72 (Amelin, 1999)。计算获得 14 颗锆石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值 -12~-1.4, 均值为 -4.8, 模式年龄 T_{DM} 值 1351~921 Ma, 均值 1062 Ma; T_{2DM} 值 2008~1340 Ma, 均值 1559 Ma。

6 讨论

6.1 花岗岩成岩时代厘定

关于都庞岭花岗岩的形成时代, 20 世纪 70—80 年代就出现了相关研究, 但一直存在争议。湖南省地质调查院 (2004) 以获得锆石 U-Pb 年龄 422~407 Ma 和 174~169 Ma 为依据, 最先将该岩

表 8 都庞岭岩体锆石 Hf 同位素分析结果

Table 8 The isotopic analysis results of zircon Hf of the Dupangling pluton

点号	年龄/ Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t)	T _{DM} /Ma	T _{2DM} /Ma	f _{La/Hf}
样号：D0056-斑状黑云母二长花岗岩										
D0056-1	215.6	0.020377	0.000721	0.282509	0.000021	-10.8	-6.2	1103	1638	-0.98
D0056-2	215.6	0.018715	0.000655	0.282532	0.000018	-10.1	-5.5	1083	1594	-0.97
D0056-3	215.6	0.020258	0.000704	0.282466	0.000015	-10.5	-5.9	1103	1622	-0.97
D0056-4	215.6	0.030060	0.001029	0.282487	0.000017	-18.7	-14.1	1425	2136	-0.97
D0056-5	215.6	0.033720	0.001157	0.282475	0.000017	-8.8	-4.2	1027	1514	-0.98
D0056-6	215.6	0.031632	0.001083	0.282244	0.000018	-9.5	-4.9	1058	1556	-0.97
D0056-7	215.6	0.022624	0.000809	0.282522	0.000018	-7.4	-2.7	965	1421	-0.98
D0056-8	215.6	0.028110	0.000998	0.282504	0.000016	-6.8	-2.2	957	1388	-0.96
D0056-9	215.6	0.017312	0.000626	0.282563	0.000027	-12.0	-7.5	1167	1719	-0.96
D0056-10	215.6	0.034881	0.001229	0.282580	0.000021	-10.5	-6.0	1101	1623	-0.97
D0056-11	215.6	0.033261	0.001262	0.282432	0.000017	-7.5	-2.9	972	1428	-0.98
D0056-12	215.6	0.029144	0.001042	0.282474	0.000021	-10.8	-6.2	1103	1638	-0.98
D0056-13	215.6	0.020128	0.000727	0.282560	0.000024	-10.1	-5.5	1083	1594	-0.97
样号：D0070-1-中粒环斑黑云母二长花岗岩										
D0070-1-1	222.8	0.019528	0.000692	0.282570	0.000025	-7.1	-2.4	957	1401	-0.98
D0070-1-2	222.8	0.019195	0.000665	0.282563	0.000018	-7.4	-2.6	966	1417	-0.98
D0070-1-3	222.8	0.033373	0.001136	0.282476	0.000016	-10.5	-5.7	1101	1615	-0.97
D0070-1-4	222.8	0.030688	0.001138	0.282500	0.000022	-9.6	-4.9	1067	1562	-0.97
D0070-1-5	222.8	0.016223	0.000576	0.282530	0.000017	-8.6	-3.8	1010	1490	-0.98
D0070-1-6	222.8	0.033771	0.001218	0.282521	0.000017	-8.9	-4.2	1040	1516	-0.96
D0070-1-7	222.8	0.034678	0.001256	0.282507	0.000016	-9.4	-4.7	1061	1547	-0.96
D0070-1-8	222.8	0.021611	0.000804	0.282537	0.000018	-8.3	-3.5	1006	1476	-0.98
D0070-1-9	222.8	0.032734	0.001206	0.282300	0.000016	-16.7	-12.0	1351	2008	-0.96
D0070-1-10	222.8	0.035717	0.001309	0.282310	0.000019	-16.3	-11.6	1341	1987	-0.96
D0070-1-11	222.8	0.022271	0.000819	0.282598	0.000024	-6.2	-1.4	921	1340	-0.98
D0070-1-12	222.8	0.030175	0.001107	0.282519	0.000019	-8.9	-4.2	1040	1519	-0.97
D0070-1-13	222.8	0.027758	0.001012	0.282538	0.000028	-8.3	-3.5	1010	1476	-0.97
D0070-1-14	222.8	0.017280	0.000636	0.282540	0.000017	-8.2	-3.4	998	1468	-0.98

体划分为西体和东体。都庞岭岩体的中体由广西第一地质队黄海波（1990）开展1：5万区域地质调查时获得锆石 U-Pb 年龄 215~213 Ma 而提出。湖南1：25万道县幅地质调查报告依据获得的锆石 U-Pb 法模式年龄 174 Ma，独居石 U-Th-Pb 法模式年龄 168 Ma，黑云母 K-Ar 法年龄值 174 Ma 和 158 Ma，认为都庞岭岩体东侧部分形成于燕山期。徐德明等（2017）获得都庞岭岩体中体和东体锆石 SHRIMP 年龄分别为 226.6±6.9 Ma 和 209.7±3.1 Ma，均属晚三叠世，为印支晚期。以往研究因缺乏系统性及受年龄精度制约导致都庞岭岩体东侧部分形成时代至今不明。

此次研究对都庞岭岩体东侧部分进行了详细的野外地质调查，在查明各类岩石侵入接触关系的基础之上，开展了系统性的高精度岩石定年，获得粗中粒斑状黑云母花岗岩的结晶年龄为 215.6±2.1 Ma，中粒斑状黑云母二长花岗岩的结晶年龄为 220.5±1.8 Ma，中粒环斑黑云母二长花

岗岩的结晶年龄为 222.8±1.5 Ma，结合徐德明等（2017）报道的细粒二云母二长花岗岩的结晶年龄 209.7±3.1 Ma，重新厘定都庞岭东侧部分花岗岩侵位于晚三叠世，而非以往认为的中侏罗世，是印支期岩浆活动产物。以往获得的年龄数据（174~158 Ma），在排除测试误差的影响外可能代表部分岩株的形成时限。此次研究结合都庞岭东侧部分岩石组合和侵入接触关系特征，至少表明都庞岭岩体中不存在燕山期花岗岩大范围出露。一般而言，花岗岩基从开始侵位到冷凝固晶完成所需时间不超过 10 Ma（秦江锋，2010），都庞岭印支期早、晚岩石侵位年龄相差约 13 Ma，表明都庞岭印支期花岗岩经历了多阶段的岩浆活动，经多个岩浆房缓慢的冷却作用和结晶分异形成。矿物化学显示环斑花岗岩中正长石（Or）和钠长石（Ab）呈负相关关系，及黑云母斑晶集合体具有多阶段熔融特征也指示岩浆的多阶段作用和震荡变化的过程。

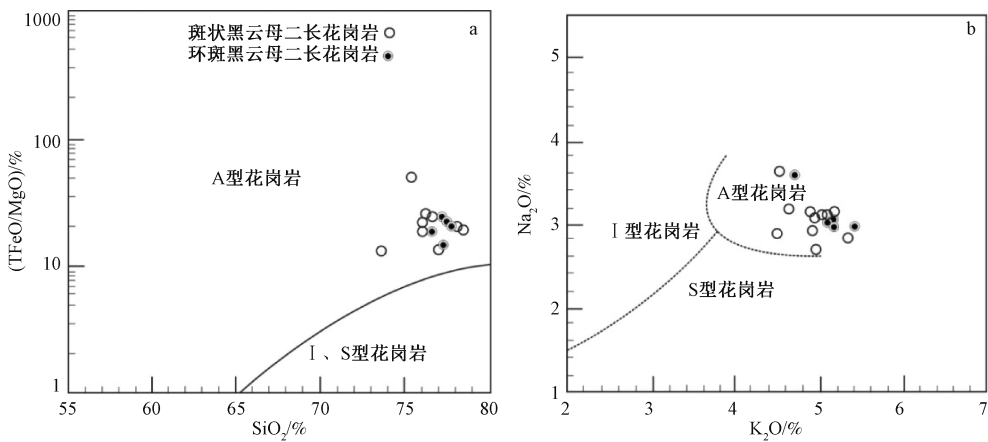
6.2 岩石类型

都庞岭黑云母二长花岗岩具有较高的 SiO_2 含量,较高的 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 值 (5.76%~8.36%),微量元素地球化学性质上表现为富集 REE (均值 274×10^{-6})、Rb、Th 和 U 及较高的高场强元素 Nb、Y 和 Ga 含量,具有高的 Ga/Al 比值,亏损 Ba、Sr、Eu ($\text{Eu}^*/\text{Eu}=0.03\sim0.84$),岩石中 P_2O_5 含量随着 SiO_2 的增高而降低,与 A 型花岗岩的变化特征一致 (李献华等, 2007; 王文龙等, 2017; 贺昕宇等, 2022)。

将微量元素蛛网图、稀土元素球粒陨石配分模式图与张旗等 (2012) 讨论的 A 型花岗岩分布曲线对比,微量元素蛛网图中的 Ba、Sr、P、Ti 低槽与 A 型花岗岩特征一致 (图 8a),稀土元素球粒陨石配分模式图与 A 型花岗岩的分布曲线也一致 (图 8b)。斑状黑云母二长花岗岩 Nd 同位素 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-8.74\sim-8.13$, $T_{2\text{DM}}$ 值为 $1.71\sim1.66$ Ga; 锆石 Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-14.1\sim-2.2$, $T_{2\text{DM}}$ 值为 $2.14\sim1.39$ Ga。环斑花岗岩的锆石 Hf 同位素

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-12.0\sim-1.4$, $T_{2\text{DM}}$ 值为 $2.01\sim1.34$ Ga, 全岩 TFeO/MgO 比值 (平均 15.43) 与 A 型花岗岩的平均值 13.48 接近 (Whalen et al., 1987), 明显高于全球典型 S 型花岗岩 (2.38)、I 型花岗岩 (2.27) 和 M 型花岗岩 (2.37), 上述岩石地球化学特征显示都庞岭黑云母二长花岗岩属 A 型花岗岩范畴。

利用 A 型花岗岩的判别图解, 黑云母二长花岗岩在 SiO_2 - TFeO/MgO 图解中投点全部落入 A 型花岗岩区域 (图 9a), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解中, 投点全部落入 A 型花岗岩区域 (图 9b); 黑云母二长花岗岩的 $10000\times\text{Ga}/\text{Al}$ 值为 $2.51\sim3.19$, 高于 I 型 (2.1) 和 S 型 (2.28) 花岗岩 (Whalen et al., 1987), 在 $10000\times\text{Ga}/\text{Al}-\text{Nb}$ 图解 (图 10a) 和 $10000\times\text{Ga}/\text{Al}-\text{TFeO}/\text{MgO}$ 图解中 (图 10b), 黑云母二长花岗岩投点全部落入 A 型花岗岩区域。从 $10000\times\text{Ga}/\text{Al}$ 值和判别图解结果来看, 都庞岭黑云母二长花岗岩具有 A 型花岗岩的地球化学特征 (苏玉平和唐红峰, 2005; 王良玉等, 2016)。



a—A 型花岗岩的 SiO_2 - TFeO/MgO 判别图解 (Whalen et al., 1987); b—A 型花岗岩的 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 判别图解 (Collins et al., 1982)

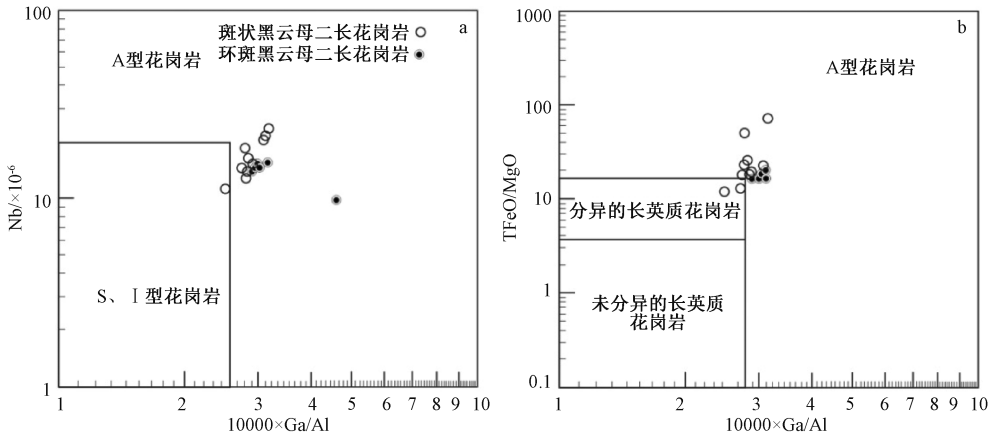
图 9 都庞岭东侧岩体岩石类型判别图解

Fig. 9 Discrimination diagram for the rock-type of the eastern part of the Dupangling pluton

(a) SiO_2 - TFeO/MgO discrimination diagram for A-type granite (Schema from Whalen et al., 1987); (b) $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ discrimination diagram for A-type granite (Schema from Collins et al., 1982)

对于 A 型花岗岩 (包括环斑花岗岩) 的成因, 目前还没有统一的认识, 其主要原因可能在于 A 型花岗岩岩浆源区本身具有不均一性 (Bonin, 2007), 它们可以来自各种源区并通过不同的过程形成 (Eby, 1992), 并由此提出了多种成因模式 (Whalen et al., 1987; 贾小辉等, 2009)。尽管 A 型花岗岩的成因模式繁多, 但其争论的焦点主要

集中在岩浆源区特征。微量元素 Rb 在成熟度高的地壳中富集, 元素 Sr 则相反, 利用 Rb/Sr 比值能反映岩浆源区性质 (王德滋等, 1993)。文章讨论的都庞岭黑云母二长花岗岩 Rb 含量均值 518.6×10^{-6} 远高于大陆上地壳的值 112×10^{-6} , Sr 含量均值 23.2×10^{-6} 远小于大陆上地壳的值 350×10^{-6} (张宏飞和高山, 2012), 且 Rb/Sr 比均值 54.51 大于地



a—A 型花岗岩的 10000×Ga/Al-Nb 判别图解 (Whalen et al. , 1987); b—A 型花岗岩的 10000×Ga/Al-TFeO/MgO 判别图解 (Whalen et al. , 1987)

图 10 都庞岭东侧岩体岩石类型判别图解

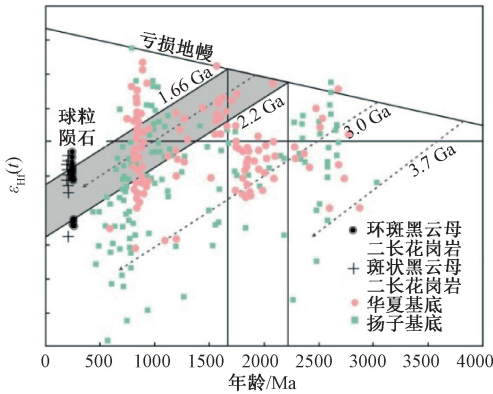
Fig. 10 Discrimination diagram for the rock-type of the eastern part of the Dupangling pluton

(a) 10000×Ga/Al-Nb discrimination diagram for A-type granite (Schema from Whalen et al. , 1987); (b) 10000×Ga/Al-TFeO/MgO discrimination diagram for A-type granite (Schema from Whalen et al. , 1987)

壳平均值 0.24 (Taylor and McLennan, 1985), 都庞岭黑云母二长花岗岩其高 Rb 低 Sr 含量及高的 Rb/Sr 比显示其源区为成熟度高的地壳物质 (专少鹏等, 2018)。

从都庞岭黑云母二长花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 关系中可以看出, 都庞岭印支期花岗岩 ϵ_{Hf} 明显为负值, 与华夏基底具有相近的 ϵ_{Hf} 值 (于津海等, 2007), 计算所得的 Hf 二阶段模式年龄均值为 1.5 Ga 和 1.6 Ga, 且大部分在图中的阴影部分区域 (图 11), 表明其源区主要为华夏陆块古元古代晚期地壳生长阶段的产物 (于津海等, 2005, 2007)。黑云母矿物化学特征显示花岗岩为壳源岩浆成因 (图 12), 以及主、微量元素及 Sr、Nd 同位素地球化学特征表明, 黑云母二长花岗岩的成岩物质主要来源于地壳, 因此可以排除幔源岩浆结晶分异成因的可能性。Conrad et al. (1988) 研究认为在水不饱和条件下花岗质熔体中的长石将向富 Or 分子演化, 文中讨论的岩石 A/NK 值为 1.12~1.42, A/CNK 值为 1.02~1.39, 与铝质 A 型花岗岩接近, 认为黑云母二长花岗岩是由缺水的长英质地壳熔融而成 (肖典等, 2016)。相对于华南印支期壳源型花岗岩, 都庞岭黑云二长母花岗岩具有较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-8.74~-8.13)、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和较年轻的 Nd 模式年龄, 可能有新生幔源物质的加入, 亦或来源于年轻地壳物质的部分熔融。由于中国东南部基底岩石的 Nd 模式年龄介于 2.2~1.8 Ga 之间 (陈江峰等, 1999), 都庞岭黑

云母二长花岗岩的 Nd 模式年龄 (1.71~1.66 Ga) 低于中国东南部基底岩石的 Nd 模式年龄, 因而都庞岭 A 型花岗岩的成因不倾向于年轻基底地壳的存在, 极大可能是在伸展的背景下, 由幔源玄武质岩浆的底侵作用导致下地壳部分重熔而形成。



(华夏基底数据引自 Yu et al. , 2010; 扬子基底数据引自 Wang et al. , 2010 和何苗等, 2018; 三条虚线代表的地壳演化趋势线引自于津海等, 2007)

图 11 都庞岭岩体印支期花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 关系图

Fig. 11 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t diagram for the Indosinian Dupangling granite (Huaxia base data from Yu et al. , 2010; Yangtze base Data from Wang et al. , 2010 and He et al. , 2018; The three dotted lines which represent crustal evolution trend from Jin et al. , 2007)

区域上报道的道县虎子岩 233~220 Ma 的基性岩石包体 (Dai et al. , 2008)、湘南宁远保安圩 212~206 Ma 的碱性玄武岩 (刘勇等, 2010)、宜

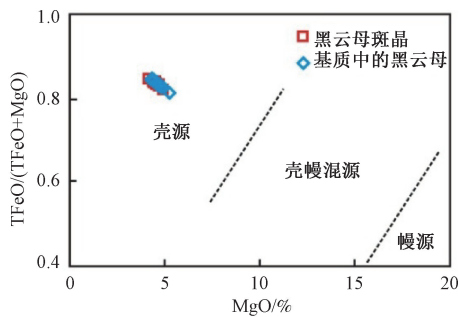


图 12 都庞岭二长花岗岩中黑云母的 $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ - MgO 图解 (周作侠, 1988)

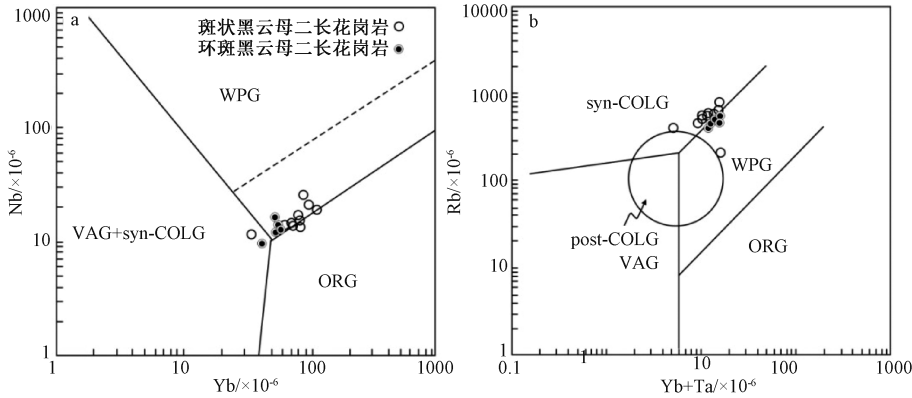
Fig. 12 $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ - MgO diagram for the biotite in the Dupangling monzonite granite

章长城岭 227 Ma 的辉绿岩 (刘勇等, 2012)、富川鲁洞 207.8 Ma 的辉绿玢岩 (时毓等, 2019)、桃江 I 型花岗岩 (Xu et al., 2014) 及华南地区呈面状零星分布的 A 型花岗岩 (杨立志等, 2018) 和紫云山、丫江桥、桃江岩体中发育的岩浆混合成因的岩石包体 (杨立志等, 2018; 李响等, 2021), 反映在华南板块内晚三叠世时期存在幔源物质的底侵活动。都庞岭岩体总体呈北东—南西向的带状分布, 区内北东—南西向断裂构造发育且与岩体展布方向基本一致, 岩体东侧为铜山岭—九嶷山双峰式构造岩浆岩带 (项媛馨和巫建华,

2012), 以及都庞岭铝质 A 型花岗岩较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和较年轻的 Nd 模式年龄等同位素特征, 表明区内该时期软流圈地幔上涌诱发的幔源岩浆沿区域性构造—岩浆带底侵导致地壳物质重熔, 形成都庞岭铝质 A 型 (局部为环斑) 花岗岩。

6.3 花岗岩形成的构造背景及意义

都庞岭印支期黑云母二长花岗岩未具有挤压变形特征, 利用微量元素构造环境判别图解, 显示投点几乎全部落入板内花岗岩区域 (图 13a)。在 $\text{Yb}+\text{Ta}$ - Rb 图解中, 投点在板内花岗岩和同碰撞花岗岩的过渡区域 (图 13b), 综合岩石学特征和图解结果认为, 都庞岭花岗岩与碰撞或消减作用无直接联系 (刘远栋等, 2022)。都庞岭印支期花岗岩侵位时限介于 222.8~209.7 Ma, 与其南部的栗木碱性花岗岩 (224.8 ± 1.6 Ma; 王艳丽, 2014) 以及其东侧的道县辉长岩 (225~224 Ma; 郭锋等, 1997; 范蔚茗等, 2003; 王艳丽, 2014) 相伴产出, 且形成时限均滞后于印支运动的变质峰期 (258~243 Ma), 显示形成于伸展的构造背景。近年来华南陆续报道有晚三叠世碱性花岗岩 (Mao et al., 2013) 和 A 型花岗岩 (彭松柏等, 2004; 李万友等, 2012), 其形成时代介于 234~202 Ma, 亦属板内伸展构造环境下的产物 (柏道远等, 2014)。



WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; post-COLG—后碰撞花岗岩

a—Nb-Y 环境判别图解; b—Rb-Yb+Ta 环境判别图解

图 13 Nb-Y 及 Rb-Yb+Ta 环境判别图解 (Pearce, 1996)

Fig. 13 Environmental discrimination diagrams of Nb-Y and Rb-Yb+Ta (Pearce, 1996)

(a) Nb-Y diagram; (b) Rb-Yb+Ta diagram

WPG—Intraplate granite; ORG—Ridge granite; VAG—Volcanic arc granite; syn-COLG—Syn-collisional granite; post-COLG—Post-collisional granite

华南印支期花岗岩形成构造背景与印支板块向华南板块俯冲碰撞 (变质基底的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄 258~243 Ma; Carter et al., 2001) 及华南板块与

华北板块碰撞形成的秦岭—大别超高压碰撞造山带 (超高压变质峰期在 238~218 Ma; 高万里等, 2014) 的构造事件密切相关; 周岱等 (2021) 认

为在二叠纪与三叠纪之交 (260~240 Ma), 华南板块南缘可能受到古特提斯洋俯冲-碰撞机制转换、峨眉山地幔柱活动和古太平洋俯冲启动等多个构造体制的影响。Küster and Harms (1998) 研究发现微量元素 Ba 在俯冲带流体中富集, Ba/Th 比值一般大于 300, 文中讨论的都庞岭黑云母二长花岗岩 Ba/Th 比值很低 (0.16~9.34), 显示不受俯冲流体的影响 (刘建朝等, 2013)。李响等 (2021) 结合云开地块变形的片麻状花岗岩 (233~230 Ma) 和未变形正常花岗岩 (232~229 Ma; Chen et al., 2017) 的形成年龄认为, 华南印支期从同碰撞造山到后造山阶段的转变发生在 230 Ma 左右。Qing et al. (2020) 最新的研究也认为, 华南在 258~231 Ma 处于同碰撞造山阶段, 231 Ma 之后转变为后造山阶段。

近年来华南地区报道的印支期 A 型花岗岩主要形成于 230 Ma 以后 (李响等, 2021), 都庞岭印支期铝质 A 型花岗岩侵位时限 222.8~209.7 Ma, 与区域上 A 型花岗岩的形成时限基本一致, 均滞后于印支板块向华南板块俯冲碰撞的主碰撞期 (即 258~231 Ma 同碰撞造山阶段; 李响等, 2021), 与后造山阶段时限吻合, 显示都庞岭印支期铝质 A 型花岗岩是在华南与印支板块后碰撞阶段地壳减压熔融背景下形成。华南地区印支期发育有大量的 A 型花岗岩, 如都庞岭印支期铝质 A 型花岗岩及局部的中粒环斑黑云母二长花岗岩、湖南锡田、浙江靖居和大爽的 A 型花岗岩, 同时区域上还发育有印支期的碱性玄武岩 (湘南地区) 以及湖南紫云山岩体、丫江桥岩体中发育岩浆混合成因的暗色微粒包体 (李万友等, 2012; 刘园园, 2013; 姚远等, 2013; 陈迪等, 2015; 杨立志等, 2018), 显示华南印支期构造属性从同碰撞造山转为后造山阶段, 区域上处于伸展构造背景, 幔源玄武质岩浆的大范围底侵形成该时期多类型岩浆岩。

7 结论

(1) 根据定年结果, 重新厘定都庞岭东侧花岗岩侵位于晚三叠世, 为印支期岩浆活动产物, 岩体侵位时限 222.8~209.7 Ma, 具多阶段岩浆活动特征。

(2) 都庞岭黑云母二长花岗岩具有较高的 SiO_2 、ALK 含量, 富集 REE、Rb、Th、U 及 HFSE

(Nb、Y 和 Ga), 亏损 Ba、Sr、Eu, 具有高的 TFeO/MgO 、Ga/Al 比值, 具有较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和较年轻的 Nd 模式年龄等特征, 显示为铝质 A 型花岗岩。

(3) 233 Ma 以后, 华南区域上处于伸展构造背景, 幔源玄武质岩浆大范围底侵诱发地壳物质重熔, 形成都庞岭铝质 A 型 (局部为环斑) 花岗岩。

References

- AMELIN Y, LEE D C, HALLIDAY A N, et al., 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. *Nature*, 399 (6733): 252-255.
- BAI D Y, CHEN B H, ZHONG X, et al., 2014. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemistry and tectonic setting of Indosinian Wutuan pluton in southwestern Hunan Province [J]. *Geology in China*, 41 (6): 2002-2018. (in Chinese with English abstract)
- BONIN B, 2007. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects [J]. *Lithos*, 97 (1-2): 1-29.
- CARTER A, ROQUES D, BRISTOW C, et al., 2001. Understanding Mesozoic accretion in southeast Asia: significance of Triassic thermotectonism (indosinian orogeny) in Vietnam [J]. *Geology*, 29 (3): 211-214.
- CHEN C H, LIU Y H, LEE C Y, et al., 2017. The Triassic reworking of the yunkai massif (South China): EMP monazite and U-Pb zircon geochronologic evidence [J]. *Tectonophysics*, 694: 1-22.
- CHEN D, SHAO Y J, LIU W, et al., 2015. Petrological and geochemical characteristics of Xitian pluton in Hunan province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 31 (1): 11-25. (in Chinese with English abstract)
- CHEN J F, GUO X S, TANG J F, et al., 1999. Nd isotopic model ages: implications of the growth of the continental crust of southeastern China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 35 (6): 649-658. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X Q, LU Y F, ZOU X W, 2008. Geochemical contrasting of Doupangling and Haiyangshan granites, Guangxi [J]. *Geology and Prospecting*, 44 (3): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A J R, et al., 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80 (2): 189-200.
- CONRAD W K, NICHOLLS I A, WALL V J, 1988. Water-saturated and-undersaturated melting of metaluminous and peraluminous crustal compositions at 10 kb: evidence for the origin of silicic magmas in the taupo volcanic zone, New Zealand, and other occurrences [J]. *Journal of Petrology*, 29 (4): 765-803.
- COX K G, BELL J D, PANKHURST R J, 1979. The interpretation of igneous rocks [M]. Dordrecht: Springer, 1-450.
- DAI B Z, JIANG S Y, JIANG Y H, et al., 2008. Geochronology,

- geochemistry and Hf-Sr-Nd isotopic compositions of Huziyan mafic xenoliths, southern Hunan Province, South China: petrogenesis and implications for lower crust evolution [J]. *Lithos*, 102 (1-2): 65-87.
- EBYG N, 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 20 (7): 641-644.
- FAN W M, WANG Y J, GUO F, et al., 2003. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi provinces and the lithospheric extension [J]. *Earth Science Frontiers*, 10 (3): 159-169. (in Chinese with English abstract)
- FOSTER M D, 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [M]. Washington: United States Government Printing Office, 1-49.
- 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.
- FU J H, ZHANG J X, ZHONG J, 2018. The relation between the regional geochemical spatial distribution and rock, formation, mineralization in the Dupangling-Tongshanling-Jiuyishan Area [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 34 (5): 35-40. (in Chinese with English abstract)
- GAO W L, WANG Z X, LICAL, et al., 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and tectonic implication of indosinian granite from southeastern Zhejiang, South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88 (6): 1055-1067. (in Chinese with English abstract)
- GRIFFIN W L, WANG X, JACKSON S E, et al., 2002. Zircon Chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 61 (3-4): 237-269.
- GUO F, FAN W M, LIN K, et al., 1997. Sm-Nd isotopic age and genesis of gabbro xenoliths in Daoxian County, Hunan Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 42 (21): 1814-1817.
- HE M, LIU Q, SUN J F, et al., 2018. Geochemical characteristics and tectonic significance of the Xitian Indosinian granites in eastern Hunan Province, South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34 (7): 2065-2086. (in Chinese with English abstract)
- HE X Y, FANG T H, BO H T, et al., 2022. Petrogenesis and tectonic significance of Late Permian-Middle Triassic granitoids in Guobaoshan, eastern section of the eastern Tianshan mountains: Constraints from geochronology and geochemistry [J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (1): 126-142. (in Chinese with English abstract)
- HOU K J, LI Y H, XIE G Q, 2011. Analysis method of Hf isotope of zircon by LA-MC-ICP MS and its geological application [M] // LI Y H. A new method of isotopic analysis and dating. Beijing: Geological Publishing House: 40-48. (in Chinese)
- Hunan Institute of Geological Survey, 2004. 1 : 250000 regional geological survey report of Hunan Dao County [R]. 1-335. (in Chinese)
- HUANG H B, 1990. Characteristics of the Dupangling granite in Guangxi [J]. *Regional Geology of China*. (3): 231-236. (in Chinese)
- JIA X H, WANG Q, TANG G J, 2009. A-type granites: research progress and implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33 (3): 465-480. (in Chinese with English abstract)
- KÜSTER D, HARMS U, 1998. Post-collisional potassic granitoids from the southern and northwestern parts of the late Neoproterozoic East African Orogen: a review [J]. *Lithos*, 45 (1-4): 177-195.
- LEI T C, CUI F, YU F M, 2012. The application of multi-source information fusion based on remote sensing to ore prospecting prediction in southern Yongzhou of Hunan Province [J]. *Geology in China*, 39 (4): 1069-1080. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, MA C Q, LIU Y Y, et al., 2012. Discovery of the indosinian aluminum A-type granite in Zhejiang Province and its geological significance [J]. *Science China Earth Sciences*, 55 (1): 13-25.
- LI X, WANG L Z, TU B, et al., 2021. Zircon geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Taibao Pluton in northwest Guangdong Province [J]. *Earth Science*, 46 (4): 1199-1216. (in Chinese with English abstract)
- LI X F, FENG Z H, XIAO R, et al., 2012. Spatial and temporal distributions and the geological setting of the W-Sn-Mo-Nb-Ta deposits at the northeast Guangxi, South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 86 (11): 1713-1725. (in Chinese with English abstract)
- LI X H, LI W X, LI Z X, 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 (14): 1873-1885.
- LI Z J, 2018. Granite in northern Guangxi geochemical characteristics and metallogenic potential analysis [D]. Guilin: Guilin University of Technology: 1-148. (in Chinese with English abstract)
- LIU J C, WANG D Q, ZHANG H D, et al., 2013. Petrogenesis and tectonic significance of granite in the Haoyaoerhudong gold deposit in Inner Mongolia [J]. *Journal of Geomechanics*, 19 (4): 413-422. (in Chinese with English abstract)
- LIU X F, YUAN S D, WU S H, 2012. Re-Os dating of the molybdenite from the Jinchuantang tin-bismuth deposit in Hunan Province and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (1): 39-51. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y, LI T D, XIAO Q H, et al., 2010. New chronology of the Ningyuan alkali basalt in southern Hunan, China: evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating [J]. *Geological Bulletin of China*, 29 (6): 833-841. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y, LI T D, XIAO Q H, et al., 2012. Formation epoch and origin of the Yizhang andesite, diabase and granite-porphyry in Yizhang County, southern Hu'n'an Province: zircon U-Pb age and Hf isotopes [J]. *Geological Bulletin of China*, 31 (9): 1363-1378. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y D, SU X L, CHENG H Y, et al., 2022. Geochronological and geochemical characteristics of the Caledonian Longquan pluton in southern Zhejiang, and their geological significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (2): 237-256. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y Y, 2013. Triassic Shoshonite association: A-type granites belt in

- South China and its geological implications [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan); 38-80.
- MANIAR P D, PICCOLI P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *GSA Bulletin*, 101 (5): 635-643.
- MAO J R, YE H M, LIU K, et al., 2013. The Indosinian collision-extension event between the South China Block and the Palaeo-Pacific plate: evidence from Indosinian alkaline granitic rocks in Dashuang, eastern Zhejiang, South China [J]. *Lithos*, 172-173: 81-97.
- MAO J W, XIE G Q, GUO C L, et al., 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: metallogenic ages and corresponding geodynamic processes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10): 2329-2338. (in Chinese with English abstract)
- PEARCE J, 1996. Sources and settings of granitic rocks [J]. *Episodes*, 19 (4): 120-125.
- PENG S B, JIN Z M, FU J M, et al., 2004. Origin of charnockite and its tectonic significance [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 20 (4): 63-70. (in Chinese with English abstract)
- PENG X J, LIU Y R, LI C H, et al., 2005. The proofs of existing earth crust's double foundation in the area of Duoponglin-Jiuyan mountainous [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 21 (4): 18-22. (in Chinese with English abstract)
- QIN J F, 2010. Petrogenesis and geodynamic implications of the late-triassic granitoids from the Qinling orogenic belt [D]. Xi'an: Northwest University; 1-282. (in Chinese with English abstract)
- QING L, JIANG Y H, DU F G, 2020. Petrogenesis and tectonic significance of early indosinian A-type granites in the Xinxing Pluton, Southern South China [J]. *Mineralogy and Petrology*, 114 (3): 217-242, doi: 10.1007/S00710-020-00701-3.
- SHI Y, SAN Y H, GUO Z C, et al., 2019. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotope compositions of the sillite from Ludong in Fuchuan, northeastern Guangxi [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 39 (2): 291-300. (in Chinese with English abstract)
- SMITH J V, 1974. Feldspar minerals; 2 chemical and textural properties [M]. Berlin, Heidelberg: Springer; 1-699.
- SONG B, ZHANG Y H, WAN Y S, et al., 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating [J]. *Geological Review*, 48 (S1): 26-30. (in Chinese with English abstract)
- SU Y P, TANG H F, 2005. Trace element geochemistry of A-type granites [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24 (3): 245-251. (in Chinese with English abstract)
- 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.
- TAO J H, CEN T, LONG W G, et al., 2015. Mineral chemistry of biotites from the Indosinian weakly peraluminous and strongly peraluminous granites in South China and their constraints on petrogenesis [J]. *Earth Science Frontiers*, 22 (2): 64-78. (in Chinese with English abstract)
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M, 1985. The continental crust: its composition and evolution; an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication.
- WANG D Z, LIU C S, SHEN W Z, et al, 1993. The contrast between Tonglu I-type and Xiangshan S-type Clastoporphyrityc lava [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9 (1): 44-54. (in Chinese with English abstract)
- WANG L J, GRIFFIN W L, YU J H, et al., 2010. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks [J]. *Precambrian Research*, 177 (1-2): 131-144.
- WANG L Y, LIAO Q A, XIAO D, et al., 2016. Petrogenesis and tectonic significance of early carboniferous A-type granite in Harlik, Xinjiang [J]. *Journal of Geomechanics*, 22 (4): 1032-1048. (in Chinese with English abstract)
- WANG W L, TENG X J, LIU Y, et al., 2017. Zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of the Wuheertu granite mass in Langshan, Inner Mongolia [J]. *Journal of Geomechanics*, 23 (3): 382-396. (in Chinese with English abstract)
- WANG X X, WANG T, LU X X, 2001. Studies and problems on rapakivi granites [J]. *Geological Science and Technology Information*, 20 (4): 19-23. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y L, 2014. Early Yanshan granitic magmatic-hydrothermal evolution and tungsten deposits mineralization in Southeast Hunan [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing); 1-168. (in Chinese with English abstract)
- WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W, 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95 (4): 407-419.
- WILLIAMS I S, CLAESSESON S, 1987. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides: II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97 (2): 205-217.
- WILSON M, 1989. Igneous petrogenesis a global tectonic approach [M]. Dordrecht: Springer; 1-466.
- WU F Y, LI X H, ZHENG Y F, et al., 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 185-220. (in Chinese with English abstract)
- XIANG Y X, WU J H, 2012. SHRIMP zircon U-Pb age of Yutian Group basalts in Longnan area of southern Jiangxi Province and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 31 (5): 716-725. (in Chinese with English abstract)
- XIAO D, LIAO Q A, WANG L Y, et al., 2016. Petrogenesis and tectonic implications of two types early silurian granites in East Junggar [J]. *Journal of Geomechanics*, 22 (4): 1049-1061. (in Chinese with English abstract)
- XIE G H, 2005. Petrology and geochemistry of Damiao anorthosite and Miyun rapakivi granite-Also on global petrographic anorthosite and rapakivi granitoid [M]. Beijing: Science Press; 1-195. (in Chinese)
- XIE H, TIAN J C, ZHANG G L, et al., 2009. A preliminary study on the space distribution regularity of "Increasing distance pattern" of

- mineralized veins and its structural relation: taking nanzhuhe tin deposit in Dupangling area, South China as an example [J]. Geological Journal of China Universities, 15 (4): 477-484. (in Chinese with English abstract)
- XU D M, FU J M, CHEN X Q, et al., 2017. Formation age and petrogenesis of the Dupangling rapakivi granites and its geological significance [J]. Geotectonica et Metallogenia, 41 (3): 561-576. (in Chinese with English abstract)
- XU H J, MA C Q, ZHAO J H, et al., 2014. Magma mixing generated triassic I-type granites in South China [J]. The Journal of Geology, 122 (3): 329-351.
- YANG J H, WU F Y, LIU X M, et al., 2005. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of the Miyun rapakivi granites from Beijing, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 21 (6): 1633-1644. (in Chinese with English abstract)
- YANG L Z, WU X B, HU B, et al., 2018. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotope of Wangxian granodiorite-porphyry in eastern Hunan Province and its geological significance [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 49 (9): 2280-2291. (in Chinese with English abstract)
- YAO Y, CHEN J, LU J J, et al., 2013. Geochronology, Hfisotopic compositions and geochemical characteristics of xitian A-type granite and its geological significance [J]. Mineral Deposits, 32 (3): 467-488.
- YU J H, ZHOU X M, ZHAO L, et al., 2005. Mantle-crust interaction generating the Wuping granites: evidenced from Sr-Nd-Hf-U-Pb isotopes [J]. Acta Petrologica Sinica, 21 (3): 651-664.
- YU J H, WANG L J, WANG X L, et al., 2007. Geochemistry and geochronology of the Fucheng Complex in the southeastern Jiangxi Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 23 (6): 1441-1456. (in Chinese with English abstract)
- YU J H, O'REILLY S Y, WANG L J, et al., 2010. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block, South China: evidence from U-Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments [J]. Precambrian Research, 181 (1-4): 97-114.
- YUAN S D, LIU X F, WANG X D, et al., 2012. Geological characteristics and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology of the Hongqiling tin deposit in southern Hunan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 28 (12): 3787-3797. (in Chinese with English abstract)
- YUAN S D, WANG X D, 2013. Zircon LA- (MC) -ICP-MS U-Pb dating and its geological significance of Xianglinpu Pluton in Weijia Tungsten Mine Area, southern Hunan [J]. Acta Geologica Sinica, 87 (S1): 62-64. (in Chinese)
- ZHANG H F, GAO S, 2012. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-410. (in Chinese)
- ZHANG L J, MA C Q, WANG L X, et al., 2011. Discovery of Paleoproterozoic rapakivi granite on the northern margin of the Yangtze block and its geological significance [J]. Chinese Science Bulletin, 56 (3): 306-318.
- ZHANG Q, RAN H, LI C D, 2012. A-type granite: what is the essence? [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 31 (4): 621-626.
- ZHAO S R, BIAN Q J, LING Q C, 2004. Crystallography and mineralogy [M]. Beijing: Higher Education Press: 1-466. (in Chinese)
- ZHENG Q R, 1983. Calculation of the Fe^{3+} and Fe^{2+} contents in silicate and Ti-Fe oxide minerals from epma data [J]. Acta Mineralogica Sinica, 3 (1): 55-62. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU B, WANG F Y, SUN Y, et al., 2008. Geochemistry and tectonic affinity of Shanewan orogenic rapakivi from Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 24 (6): 1261-1272. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU D, HU J, YANG W Q, et al., 2021. Formation age and petrogenesis of the Xinxing pluton in western Guangdong: constraint on the closure of the East Paleo-Tethys Ocean [J]. Geology in China, 48 (6): 1896-1923. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Z X, 1988. Chemical characteristics of mafic mica in intrusive rocks and its geological meaning [J]. Acta Petrologica Sinica, 4 (3): 63-73. (in Chinese with English abstract)
- ZHUAN S P, BAI C D, MAO Z F, et al., 2018. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the sugaitilike late silurian granites in Southern Kudi, Xinjiang and its geotectonic significance [J]. Journal of Geomechanics, 24 (5): 661-669. (in Chinese with English abstract)
- ZOU X W, CUI S, QU W J, et al., 2009. Re-Os isotope dating of the Liguifu tungsten-tin polymetallic deposit in Dupangling area, Guangxi [J]. Geology in China, 36 (4): 837-844. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 柏道远, 陈必河, 钟响, 等, 2014. 湘西南印支期五团岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及形成背景 [J]. 中国地质, 41 (6): 2002-2018.
- 陈迪, 邵拥军, 刘伟, 等, 2015. 湖南锡田复式花岗岩体岩石学、岩石地球化学特征: 兼对岩石成因类型、岩体侵位机制的探讨 [J]. 华南地质与矿产, 31 (1): 11-25.
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 等, 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 35 (6): 649-658.
- 陈希清, 路远发, 邹先武, 2008. 广西都庞岭、海洋山花岗岩体地球化学特征对比 [J]. 地质与勘探, 44 (3): 34-39.
- 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 等, 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展 [J]. 地学前缘, 10 (3): 159-169.
- 符金豪, 张建新, 钟坚, 2018. 都庞岭-铜山岭-九嶷山地区区域地球化学空间分带与岩体-地层-成矿作用的关系 [J]. 科技通报, 34 (5): 35-40.
- 高万里, 王宗秀, 李春麟, 等, 2014. 浙东南印支期花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及构造意义 [J]. 地质学报, 88 (6): 1055-1067.
- 郭锋, 范蔚茗, 林舸, 等, 1997. 湘南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨 [J]. 科学通报, 42 (15): 1661-1664.
- 何苗, 刘庆, 孙金凤, 等, 2018. 湘东地区锡田印支期花岗岩的地球化学特征及其构造意义 [J]. 岩石学报, 34 (7): 2065-2086.
- 贺昕宇, 方同辉, 薄贺天, 等, 2022. 东天山东段国宝山晚二叠世—

- 中三叠世花岗岩岩石成因与构造意义：年代学和地球化学约束 [J]. 地质力学学报, 28 (1): 126-142.
- 侯可军, 李延河, 谢桂青, 2011. LA-MC-ICP MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用 [M] //李延河. 同位素分析和定年新方法. 北京: 地质出版社: 40-48.
- 黄海波, 1990. 广西都庞岭花岗岩体基本特征 [J]. 中国区域地质, (3): 231-236.
- 湖南省地质调查院. 2004. 1:25 万湖南道县区域地质调查报告, 1-335.
- 贾小辉, 王强, 唐功建, 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义 [J]. 大地构造与成矿学, 33 (3): 465-480.
- 雷天赐, 崔放, 余凤鸣, 2012. 基于遥感的多源信息融合在湖南永州南部地区找矿预测中的应用 [J]. 中国地质, 39 (4): 1069-1080.
- 李万友, 马昌前, 刘园园, 等, 2012. 浙江印支期铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (2): 164-177.
- 李响, 王令占, 涂兵, 等, 2021. 粤西北印支期太保岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及岩石成因 [J]. 地球科学, 46 (4): 1199-1216.
- 李献华, 李武显, 李正祥, 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义 [J]. 科学通报, 52 (9): 981-991.
- 李晓峰, 冯佐海, 肖荣, 等, 2012. 桂东北钨锡稀有金属矿床的成矿类型、成矿时代及其地质背景 [J]. 地质学报, 86 (11): 1713-1725.
- 李镇江, 2018. 广西桂北地区花岗岩的地球化学特征与成矿潜力分析 [D]. 桂林: 桂林理工大学: 1-148.
- 刘建朝, 王得权, 张海东, 等, 2013. 内蒙古浩尧尔忽洞金矿区花岗岩岩石成因及构造意义 [J]. 地质力学学报, 19 (4): 413-422.
- 刘晓菲, 袁顺达, 吴胜华, 2012. 湖南金船塘钨铋矿床辉钨矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义 [J]. 岩石学报, 28 (1): 39-51.
- 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 等, 2010. 湘南宁远地区碱性玄武岩形成时代的新证据: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年 [J]. 地质通报, 29 (6): 833-841.
- 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 等, 2012. 湘南宜章地区辉绿岩、花岗斑岩、安山岩的形成时代和成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成 [J]. 地质通报, 31 (9): 1363-1378.
- 刘远栋, 苏小浪, 程海艳, 等, 2022. 浙南加里东期龙泉岩体年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. 地质力学学报, 28 (2): 237-256.
- 刘园园, 2013. 华南三叠纪橄榄玄粗岩系列: A 型花岗岩带及其地质意义 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉): 38-80.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等, 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景 [J]. 岩石学报, 23 (10): 2329-2338.
- 彭松柏, 金振民, 付建明, 等, 2004. 紫苏花岗岩成因及构造意义 [J]. 华南地质与矿产, 20 (4): 63-70.
- 彭学军, 刘耀荣, 李泽泓, 等, 2005. 都庞岭-九嶷山地区早元古代地壳存在证据 [J]. 华南地质与矿产, 21 (4): 18-22.
- 秦江锋, 2010. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩类成因机制及深部动力学背景 [D]. 西安: 西北大学: 1-282.
- 时毓, 三元合, 郭智超, 等, 2019. 桂东北富川鲁洞辉绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成 [J]. 桂林理工大学学报, 39 (2): 291-300.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等, 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论 [J]. 地质论评, 48 (S1): 26-30.
- 苏玉平, 唐红峰, 2005. A 型花岗岩的微量元素地球化学 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 24 (3): 245-251.
- 陶继华, 岑涛, 龙文国, 等, 2015. 华南印支期弱过铝质和强过铝质花岗岩中黑云母的矿物化学及其岩石成因制约 [J]. 地学前缘, 22 (2): 64-78.
- 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等, 1993. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比 [J]. 岩石学报, 1993, 9 (1): 44-54.
- 王良玉, 廖群安, 肖典, 等, 2016. 新疆哈尔里克早石炭世 A 型花岗岩的岩石成因及构造意义 [J]. 地质力学学报, 22 (4): 1032-1048.
- 王文龙, 滕学建, 刘洋, 等, 2017. 内蒙古狼山乌和尔图花岗岩岩体锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征 [J]. 地质力学学报, 23 (3): 382-396.
- 王晓霞, 王涛, 卢欣祥, 2001. 环斑花岗岩研究及存在的问题 [J]. 地质科技情报, 20 (4): 19-23.
- 王艳丽, 2014. 湘东南地区燕山早期花岗岩浆-热液演化及钨矿成矿作用研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京): 1-168.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. 岩石学报, 23 (2): 185-220.
- 项媛馨, 巫建华, 2012. 赣南龙南地区余田群玄武岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 地质通报, 31 (5): 716-725.
- 肖典, 廖群安, 王良玉, 等, 2016. 准噶尔东部早志留世两类花岗岩的岩石成因及构造意义 [J]. 地质力学学报, 22 (4): 1049-1061.
- 解广轰, 2005. 大庙斜长岩和密云环斑花岗岩的岩石学和地球化学: 兼论全球岩体型斜长岩和环斑花岗岩类的时空分布及其意义 [M]. 北京: 科学出版社: 1-195.
- 解惠, 田景春, 张桂林, 等, 2009. 矿脉“线性递变不等距”分布规律与构造关系研究: 以广西都庞岭地区南竹河锡矿床为例 [J]. 高校地质学报, 15 (4): 477-484.
- 徐德明, 付建明, 陈希清, 等, 2017. 都庞岭环斑花岗岩的形成时代、成因及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 41 (3): 561-576.
- 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 等, 2005. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义 [J]. 岩石学报, 21 (6): 1633-1644.
- 杨立志, 吴湘滨, 胡斌, 等, 2018. 湘东王仙花岗岩闪长斑岩的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 49 (9): 2280-2291.
- 姚远, 陈骏, 陆建军, 等, 2013. 湘东锡田 A 型花岗岩的年代学、Hf 同位素、地球化学特征及其地质意义 [J]. 矿床地质, 32 (3): 467-488.
- 于津海, 周新民, 赵蕾, 等, 2005. 壳幔作用导致武平花岗岩形成: Sr-Nd-Hf-U-Pb 同位素证据 [J]. 岩石学报, 21 (3): 651-664.
- 于津海, 王丽娟, 王孝磊, 等, 2007. 赣东南富城杂岩体的地球化学和年代学研究 [J]. 岩石学报, 23 (6): 1441-1456.
- 袁顺达, 刘晓菲, 王旭东, 等, 2012. 湘南红旗岭锡多金属矿床地质特征及 Ar-Ar 同位素年代学研究 [J]. 岩石学报, 28 (12):

3787-3797.

袁顺达, 王旭东, 2013. 湘南魏家钨矿区祥林铺岩体的锆石 LA-(MC) -ICP-MS U-Pb 测年及意义 [J]. 地质学报, 87 (S1): 62-64.

张宏飞, 高山, 2012. 地球化学 [M]. 北京: 地质出版社: 1-410.

张丽娟, 马昌前, 王连训, 等, 2011. 扬子地块北缘古元古代环斑花岗岩的发现及其意义 [J]. 科学通报, 56 (1): 44-57.

张旗, 冉焱, 李承东, 2012. A 型花岗岩的实质是什么? [J]. 岩石矿物学杂志, 31 (4): 621-626.

赵珊茸, 边秋娟, 凌其聪, 2004. 结晶学及矿物学 [M]. 北京: 高等教育出版社: 1-466.

郑巧荣, 1983. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. 矿物学报, 3 (1): 55-62.

周滨, 汪方跃, 孙勇, 等, 2008. 秦岭沙河湾造山带型环斑花岗岩地球化学及构造属性讨论 [J]. 岩石学报, 24 (6): 1261-1272.

周岱, 胡军, 杨文强, 等, 2021. 粤西新兴岩体的形成时代与成因研究: 对古特提斯洋东支关闭时间的约束 [J]. 中国地质, 48 (6): 1896-1923.

周作侠, 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义 [J]. 岩石学报, 4 (3): 63-73.

专少鹏, 白春东, 毛志芳, 等, 2018. 新疆库地南苏盖提力克晚志留世花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及大地构造意义 [J]. 地质力学学报, 24 (5): 661-669.

邹先武, 崔森, 屈文俊, 等, 2009. 广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿 Re-Os 同位素定年研究 [J]. 中国地质, 36 (4): 837-844.