

Geochemical Characteristics and Tectonic Background of Trachydacite in the Rough Surface of North Wuyi Dongxiang Volcanic Basin

Mengyu Tian¹, Yongjun Di¹, Qiu Yang^{1,2}, Mingjian Yang¹, Shiwei Wang¹, Shuai Wang¹

¹School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing

²Shandong Zhengyuan Geophysical Information Technology Co., Ltd., Ji'nan Shandong

Email: 1165929799@qq.com, *diyongjun@cugb.edu.cn

Received: Apr. 8th, 2020; accepted: Apr. 22nd, 2020; published: Apr. 30th, 2020

Abstract

The tectonic background of potassium basalt series of volcanic rocks has been a hot topic in geoscience. To further explore the formation period and tectonic evolution process of volcanic rocks in Dongxiang volcanic basin, this paper studies the lithologic, LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb chronology and geochemistry of trachydacite in Dongxiang volcanic basin. The zircon U-Pb dating results showed that the crystallization age of the trachydacite was 135.5 ± 2.1 Ma and 137.3 ± 2.3 Ma, responding to the early Cretaceous volcanic-magmatic events in South China. The trachydacite is characterized by high potassium, calcium and alkaline aluminum, enrichment of large ionophilic elements, loss of high field strength elements, relative enrichment of light rare earth elements (LREE), relative loss of heavy rare earth elements (HREE), weak Eu negative anomaly and other characteristics. Accordingly, we attribute the formation of the Dongxiang volcanic basin to the deep subduction of the ancient Pacific plate to the Eurasian plate. The crust shortens and thickens, and the mantle magma rises, which causes partial melting by heating the crust. The basaltic magma produced in the lower part was assimilated and mixed to form dacite magma.

Keywords

Dongxiang Volcanic Basin, Trachydacite, Zircon U-Pb Chronology, Geochemical Characteristics, Tectonic Evolution

北武夷东乡火山盆地粗面英安岩的地球化学特征及构造背景

田梦宇¹, 狄永军¹, 杨秋^{1,2}, 杨明建¹, 王世伟¹, 王帅¹

*通讯作者。

文章引用: 田梦宇, 狄永军, 杨秋, 杨明建, 王世伟, 王帅. 北武夷东乡火山盆地粗面英安岩的地球化学特征及构造背景[J]. 地球科学前沿, 2020, 10(4): 312-328. DOI: 10.12677/ag.2020.104029

¹中国地质大学地球科学与资源学院, 北京

²山东正元地球物理信息技术有限公司, 山东 济南

Email: 1165929799@qq.com, *diyongjun@cugb.edu.cn

收稿日期: 2020年4月8日; 录用日期: 2020年4月22日; 发布日期: 2020年4月30日

摘要

钾玄质系列火山岩的构造背景一直是地学界讨论的热点。为进一步探明东乡火山盆地火山岩的形成时代及构造演化过程, 本文对东乡火山盆地的粗面英安岩进行了岩石学、LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年代学及地球化学研究。锆石U-Pb测年结果显示粗面英安岩的结晶年龄在 135.5 ± 2.1 Ma和 137.3 ± 2.3 Ma, 属于早白垩世, 对应于华南早白垩世的火山岩浆活动。粗面英安岩具有高钾钙碱性过铝质的特征, 富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 相对富集轻稀土元素(LREE), 相对较亏损重稀土元素(HREE), 较弱的Eu负异常等特征。据此, 本文提出北武夷东乡火山盆地的形成与古太平洋板块向欧亚板块的深俯冲作用有关。地壳缩短加厚, 地幔岩浆上升, 使地壳受热而引起部分熔融, 下部产生的玄武质岩浆经同化混染作用形成英安质岩浆。

关键词

东乡火山盆地, 粗面英安岩, 锆石U-Pb年代学, 地球化学特征, 构造演化

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自20世纪80年代以来, 华南地区中生代火山岩一直是我国地质学领域的研究热点之一, 主要得出3种成因观点: 1) 扭断层系活动导致地壳重熔形成大量的中生代长英质岩浆[1][2], 2) 活动大陆边缘观点, 认为古太平洋板块俯冲作用导致广泛的俯冲带地幔楔和地壳广泛熔融[3]-[8]。3) 认为中生代火山岩带是岩石圈伸展背景下软流圈-岩石圈相互作用的产物[9][10][11][12]。华南大陆构造演化经历了扬子-华夏板块递进式汇聚拼合、大规模伸展、构造-岩浆-成矿、江南持续隆升, 华南强烈热隆等几个重要阶段。华南大陆燕山晚期区域性伸展构造广泛发育, 存在“华南热隆”构造, 震旦系地层内发育典型的滑覆构造, 同期大规模岩浆活动、火山活动和大规模的热液成矿。燕山期岩浆活动在华南地区分布最为广泛(图1), 岩石类型丰富多样, 从中性-中酸性-酸性岩均有分布演化时间长, 为180~90 Ma [13]。在这时期产生矿床中, 大多与中生代岩浆岩密切共生[14]-[19]。北武夷地区位于华南板块东部怀玉山构造带上, 在古生代断陷盆地的基础上形成了一系列中生代火山盆地, 自西向东依次为东乡火山盆地、天华山火山盆地、黄岗山火山盆地、梨子坑火山盆地及仙霞岭火山盆地(图2) [20] [21]。前人对区内火山岩做了一系列的研究, 获得其成岩年龄从 148.9 ± 0.1 Ma到 120 ± 4 Ma, 主要形成于晚侏罗世和早白垩世, 总结起来有以下一些数据: 蔡家桥打鼓顶组流纹质熔结凝灰岩 K-Ar 年龄为 141 ± 1.9 Ma [22]; 上饶县鹅湖岭组流纹英安岩 Ar^{40}/Ar^{39} 年龄 148.9 ± 0.1 Ma [23]; 断裂带内长英质脉体钾长石 Ar^{40}/Ar^{39} 年龄主要成矿年龄集中于 120 ± 4 Ma 之间[24]; 研究区附近岩体以冷水坑、生米坑-篁碧、灵山-三清山、鹅湖-卧龙岗岩体为代表, 岩性以碱性花岗岩为主, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 144~121 Ma [25] [26] [27] [28]。由于前人对该地区使

用的传统定年方法(如 Rb-Sr 法、K-Ar 法)容易受到后期热液等地质作用的影响, 导致测年结果误差较大, 所获得的年龄往往不能代表准确的形成年龄。因此, 东乡火山盆地火山岩的形成时代仍需要进一步确定。

华南地区自古生代以来一直属于陆内构造演化环境。其岩石圈发生了明显的伸展作用主要形成于早侏罗世、晚侏罗世和早白垩世 3 个时期, 尽管每个时期华南不同地区岩石圈伸展的程度可能不同[29]。本文在前人对该区域研究的岩石学、年代学、地球化学及构造演化的成果基础上[20]-[28] [31] [32] [33] [34], 通过对东乡火山盆地晚中生代区域构造演化中的粗面英安岩使用更精确的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法, 测得较为准确的成岩结晶年龄, 为东乡盆地火山活动的时限提供了重要约束, 并进一步探讨了东乡火山盆地中粗面英安岩的物质来源、岩浆演化过程及构造环境。

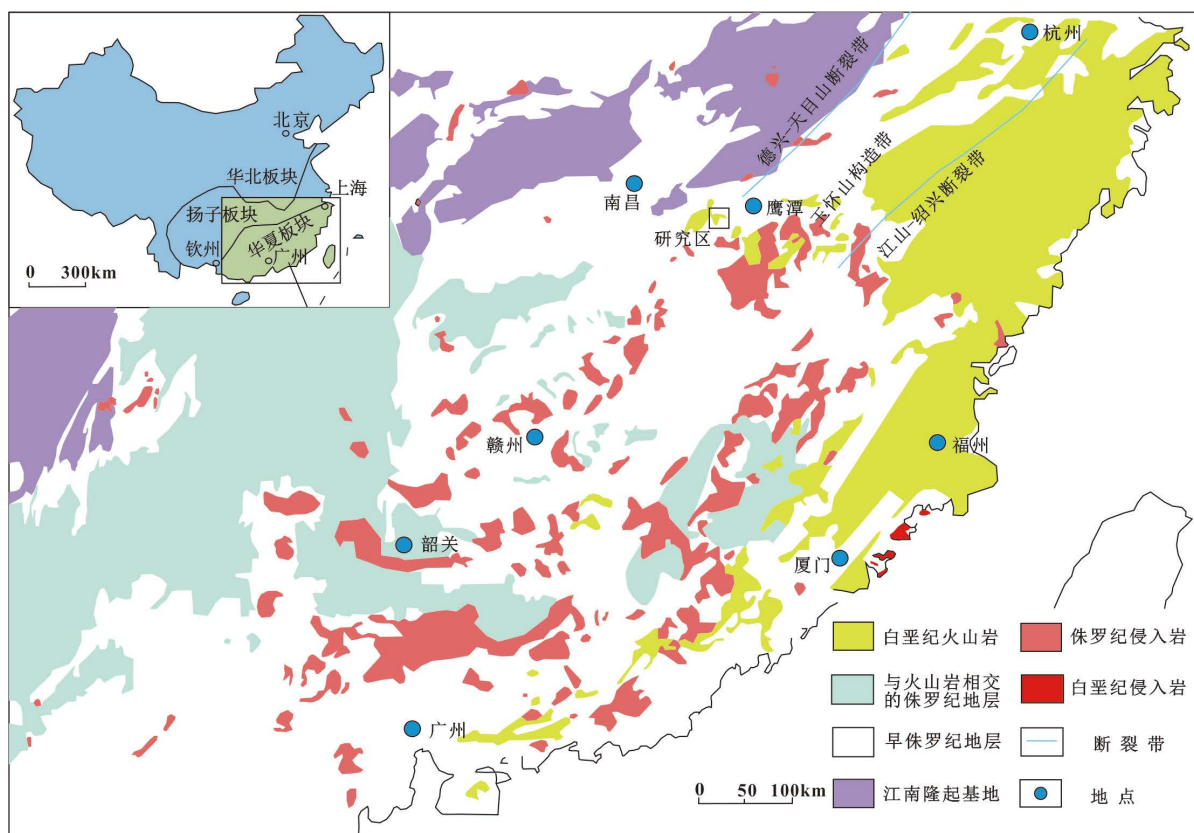


Figure 1. Mesozoic magmatic distribution map of South China Plate

图 1. 华南板块中生代岩浆岩分布简图(底图据 Guo, 2010) [30]

2. 地质背景与岩石特征

北武夷地区的火山活动主要发生在侏罗纪晚期和白垩纪早期[31], 东乡火山盆地位于东西向广丰才萍乡深大断裂带与北东向赣东北深断裂交汇处, 两者控制了区内的构造基本格局, 制约着构造层分布及岩浆作用。受其影响, 断裂构造十分发育, 大者多在火山喷发前就已经产生, 火山期后再次活动, 具有继承性和多期的特点[32]。东乡火山岩盆地系以中元古界双桥山群浅变质岩为基底, 在中生代断陷基础上产生的上叠式火山岩盆地, 形成次火山岩(石英闪长玢岩、英安玢岩、粗安山玢岩)和火山岩(凝灰岩、流纹岩-英安岩-粗面英安岩)的同源岩浆演化组合[33]。东乡火山岩盆地经历了加里东期、印支期、燕山期及喜马拉雅山期地壳运动, 断裂非常发育, 在近东西和近南北向断陷带的共同作用下形成了似“心脏”的火山构造盆地(如图 2), 这两个方向的断裂及其蚀变破碎带也成为了该区主要的控岩、控矿构造[33]。

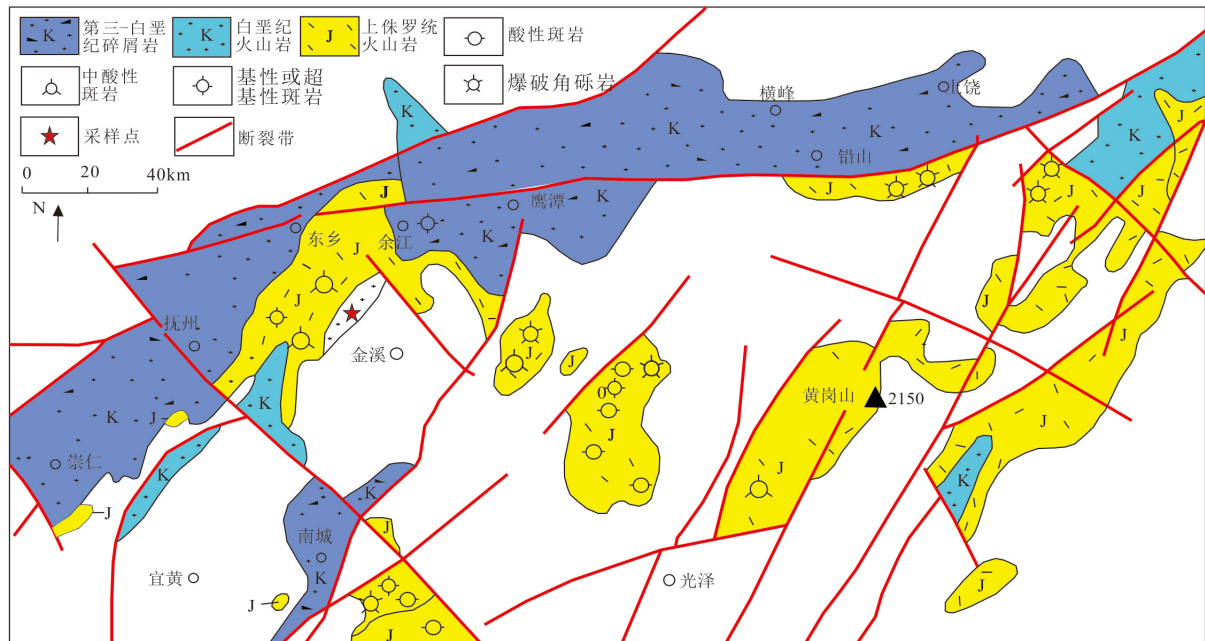
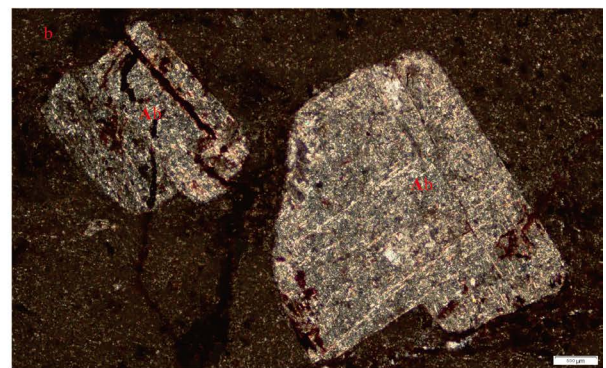
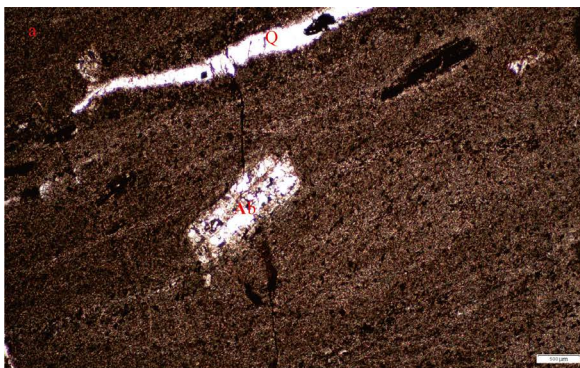


Figure 2. Distribution of the Mesozoic volcanic-Subvolcanic rocks in the Northern Wuyi Area (according to Jiangxi 912 Geological Brigade, 1993)

图 2. 北武夷地区中生代火山 - 次火山岩分布图[22]

本文样品采自当东乡区南部约 20 km，区域火山岩及相关层序为北东向延长的不规则椭圆形分布，长宽分别约为 35 km 和 15 km。区内除奥陶系、志留系及泥盆系外，从中新元古界 - 新生界各地质历史时期的地层皆有分布。据地层的岩石组合、岩相、时代、建造类型、变质程度、构造属性等特征等差异，可划分为中元古界的浅变质岩，石炭系、侏罗系、白垩系以及第四系分散沉积物。本文沿着火山岩盆地间隔约 1 km 等距离采集样品，采集的样品中选择 9 件完成初步测试分析，岩石类型都是为红色粗面英安岩。手标本为红褐色，斑状结构，致密块状。镜下为斑状结构，斑晶主要为钠长石为主，钠长石，呈片状、宽板状，有聚片双晶，粒径大小不一，约 1 mm × 2.5 mm，含量为约 15% (如图 3(a)、图 3(b))，并可观察到表面高岭土化和少量有绢云母化(有铁质) (如图 3(a)~(d))；其中，斑晶也含有少量钾长石，钾长石，呈板状，有卡氏双晶，多发生高岭土化，粒径大小约 1 mm × 2 mm，含量为约 5% (如图 3(c)、图 3(f))，基质为隐晶质(如图 3(e))；所有样品镜下均可观察到有明显的多条石英细脉(如图 3(a)、图 3(c))；还有一些存在交错的石英细脉(如图 3(f))，这样使得岩石中 SiO₂ 含量普遍相对增高。根据岩石薄片鉴定结果，岩石具斑状结构，斑晶以钠长石为主，含少量钾长石，表面较脏，表明该地区经历了较强风化能力，岩石主要发生了高岭土化和少量绢云母化(有铁质矿化)等次生变化现象。



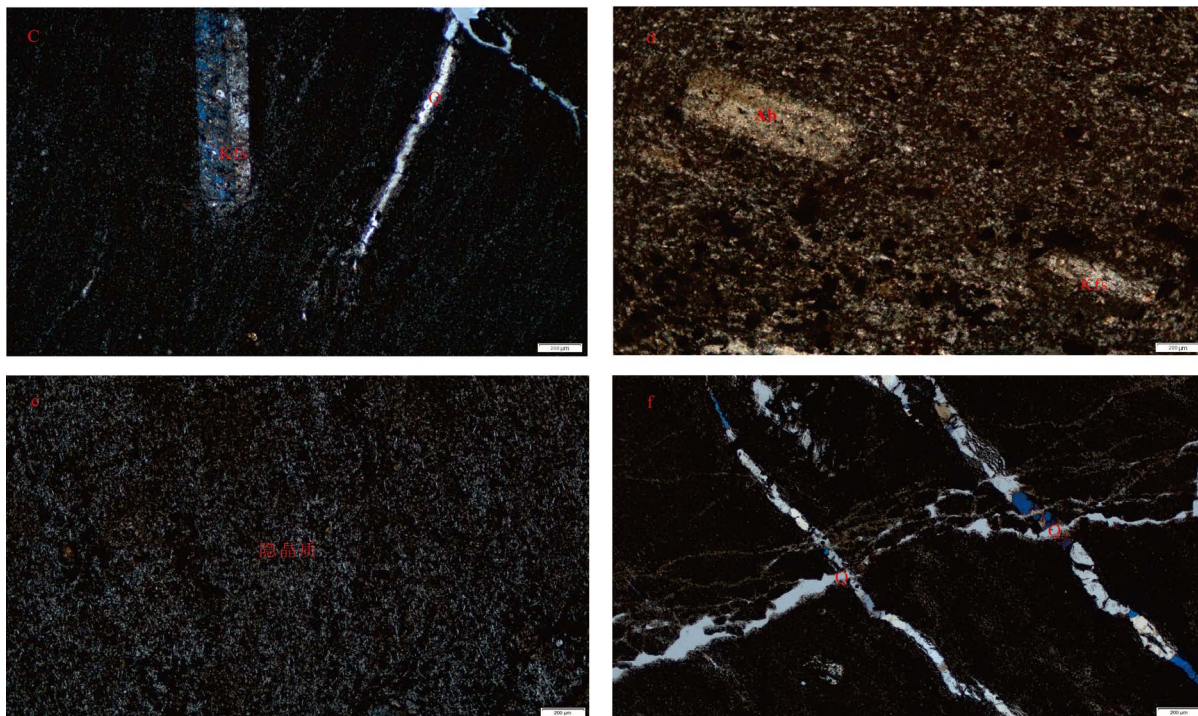


Figure 3. Photos and micrographs of crude andesite samples from Dongxiang volcanic basin. (a) Quartz is vein (Q), albite is broad plate (Ab), and its surface is kaolinized; (b) Albite is in the form of long strip (Ab), Wafer twin, and its surface is kaolinized, sericitization and ferruginous; (c) albite shows wide lamellar (Ab) Wafer twin, K-feldspar shows wide lamellar (Kfs), Casbah twin, and its surface is kaolinized; (d) Quartz veinlets (Q), K-feldspar shows wide lamellar (Kfs), Casbah twin, kaolinized on the surface; (e) cryptocrystalline texture; (f) Crisscross quartz veinlets (Q)

图 3. 东乡火山盆地粗面英安岩样品照片和显微照片: (a) 石英呈脉状(Q), 钠长石呈宽板状(Ab), 表面高岭土化; (b) 钠长石呈长条状(Ab), 聚片双晶, 表面高岭土化, 少量绢云母化, 有铁质; (c) 钠长石呈宽板状(Ab)聚片双晶, 钾长石呈宽板状(Kfs), 卡式双晶, 表面高岭土化; (d) 石英细脉(Q), 钾长石呈宽板状(Kfs), 卡式双晶, 表面高岭土化; (e) 隐晶质结构; (f) 交错的石英细脉(Q)

3. 分析方法

3.1. 主量和微量元素分析方法

在东乡火山盆地采集了 9 件相对新鲜的粗面英安岩样品进行主量、微量和稀土元素测试, 样品编号分别是(DXO68-Q1、DXO69-Q1、DXO79-Q1、DXO79-Q2、DXO85-Q1、DXO85-Q2、DXO85-Q3、DXO85-Q4 和 DXO85-Q5) (见表 1)。主微量分析均是在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成, 主量元素在 RigakuRIX 型荧光光谱仪(XRF)上进行, 微量、稀土元素的分析采用 PEELan6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成。PEELan 6000 型 ICP-MS 质谱仪具有自动聚焦及同时接收脉冲信号和模拟信号的技术, 用 10×10^{-9} 多元素标定溶液(含有低、中、高质量元素)调整透镜, 使其对每一质量数均达到最佳动态状态, 用 500×10^{-9} 标定溶液通过自动拟合使脉冲检测和模拟检测处于最佳线性状态。在分析流程中, 根据待测样品和标准溶液中内标元素计数的差异计算出校正系数、以此对待测样品的各元素浓度进行校正。由于存在基体效应的影响, 岩石样品中各元素的实际测定限一般略高于理论测定限[35]。

其中主量元素分析方法为 X 射线荧光分析法(XRF), 分析精度优于 0.1%~1%, 其中 FeO 含量用湿化学法测定, 分析精度优于 0.5%~1%。烧失量(LOI)为样品在 1000℃ 恒温下烘烤 1 个小时后的样品重量损失量。微量元素的分析方法为 ICP-MS, 实验过程中温度 20℃, 相对湿度 30% [36]。采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测试全岩主量元素, 用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)法测试全岩微量和稀土元素, 分析误差均优于 5%。

Table 1. Major (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) data of trachydacite samples
表 1. 粗面英安岩主量元素的质量百分含量(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果表

样品 岩性	DXO68-Q1 粗面英安岩	DXO69-Q1 粗面英安岩	DXO79-Q1 粗面英安岩	DXO79-Q2 粗面英安岩	DXO85-Q1 粗面英安岩	DXO85-Q2 粗面英安岩	DXO85-Q3 粗面英安岩	DXO85-Q4 粗面英安岩	DXO85-Q5 粗面英安岩
SiO ₂	69.77	68.53	70.34	70.08	69.07	69.88	69.74	69.39	70.32
TiO ₂	0.25	0.31	0.27	0.25	0.28	0.27	0.27	0.28	0.26
Al ₂ O ₃	15.08	15.58	14.17	13.85	15.58	15.47	15.34	15.46	15.35
Fe ₂ O ₃	1.49	1.45	1.20	1.22	1.21	1.15	1.25	1.35	1.10
FeO	2.73	2.65	2.29	2.29	2.33	2.21	2.38	2.57	2.07
MnO	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
MgO	0.22	0.22	0.10	0.10	0.15	0.18	0.17	0.14	0.19
CaO	0.23	0.31	0.46	1.15	0.17	0.20	0.20	0.10	0.15
Na ₂ O	2.66	2.10	2.85	3.16	2.50	2.65	2.88	2.81	3.02
K ₂ O	6.60	7.38	7.25	6.63	7.99	7.64	7.31	7.4	6.78
P ₂ O ₅	0.05	0.04	0.39	0.83	0.07	0.07	0.08	0.04	0.07
LOI	1.55	2.01	1.44	0.96	1.29	1.12	1.10	1.12	1.21
Total	99.10	98.57	99.33	99.58	99.36	99.73	99.61	99.53	99.32
ALK	9.26	9.48	10.10	9.79	10.49	10.29	10.19	10.21	9.80
Na ₂ O + K ₂ O	9.26	9.48	10.1	9.79	10.49	10.29	10.19	10.21	9.8
Rb	219.00	246.00	208.00	196.00	245.00	264.00	248.00	233.00	215.00
Ba	1302.00	1663.00	1733.00	1491.00	2247.00	1818.00	2043.00	2214.00	1589.00
Th	19.60	17.10	18.10	17.80	17.80	19.20	20.00	20.20	19.80
U	3.57	3.19	23.10	33.30	2.64	2.54	2.60	2.90	2.27
Nb	19.20	18.30	19.60	18.10	18.50	19.60	19.20	20.30	18.50
Ta	1.40	1.35	1.24	1.12	1.25	1.33	1.29	1.39	1.27
Pb	37.70	29.00	24.60	20.80	19.10	17.30	22.10	23.80	15.90
Sr	144.00	186.00	89.90	146.00	55.30	91.40	96.10	68.20	68.70
Nd	67.90	78.40	105.00	70.50	64.10	65.10	65.40	66.00	66.10
Zr	387.00	408.00	401.00	362.00	424.00	425.00	443.00	447.00	414.00
Hf	10.30	9.62	9.56	8.98	10.20	11.00	11.60	10.90	10.10
Y	33.70	41.10	58.30	67.40	30.80	37.20	33.60	33.20	33.30
La	99.70	107.00	157.00	100.00	93.30	94.40	95.30	96.00	97.00
Ce	170.00	138.00	170.00	153.00	161.00	164.00	163.00	160.00	167.00
Pr	19.00	21.00	28.90	18.60	17.60	17.80	18.20	18.40	18.60
Nd	67.90	78.40	105.00	70.50	64.10	65.10	65.40	66.00	66.10
Sm	10.80	13.50	16.90	12.10	10.30	10.60	10.40	10.40	10.60
Eu	2.19	2.78	3.15	2.88	2.15	2.17	2.17	2.25	2.18
Gd	8.91	11.40	14.30	11.50	8.26	8.64	8.49	8.34	8.61
Tb	1.38	1.71	2.10	1.86	1.26	1.31	1.36	1.33	1.32
Dy	6.97	8.86	10.20	10.10	6.23	7.03	6.31	6.49	6.46
Ho	1.16	1.51	1.86	1.91	1.07	1.24	1.13	1.26	1.13
Er	3.68	4.43	5.49	6.18	3.44	3.92	3.41	3.63	3.35
Tm	0.49	0.57	0.80	0.95	0.48	0.57	0.49	0.52	0.50
Yb	3.18	4.06	5.28	6.28	2.90	3.43	3.15	3.32	2.90
Lu	0.49	0.55	0.73	0.90	0.42	0.56	0.46	0.43	0.40
∑REE	429.55	434.87	580.02	464.16	403.31	417.96	412.88	411.57	419.44
LREE	369.59	360.68	480.95	357.08	348.45	354.07	354.47	353.05	361.48
HREE	26.26	33.09	40.77	39.68	24.06	26.69	24.81	25.32	24.66
LREE/HREE	14.07	10.09	11.80	9.00	14.48	13.27	14.29	13.94	14.66
δEu	0.68	0.69	0.62	0.75	0.71	0.69	0.71	0.74	0.70
(La/Yb) _N	22.49	18.90	21.33	11.42	23.08	19.74	21.70	20.74	23.99

数据测定：测试单位为核工业北京地质研究院，主量元素含量单位为%，微量、稀土元素为 10^{-6} 。

3.2. LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

选取 2 件新鲜的粗面英安岩样品进行锆石测年。锆石的分选是在河北廊坊市地科勘探技术服务有限公司进行,反复粉碎,在经过手工淘洗、磁选、重液分选,在双目镜下进行挑选。锆石的 U-Pb 同位素测试是在天津地质矿产研究所利用激光剥蚀多接收器电感耦合等离子质谱仪(LA-MC-ICP-MS)完成。该激光器为美国 ESI 公司生产的 UP193-FXArF 准分子激光器,激光的波长为 193 nm,脉冲宽度为 5 ns,束斑直径可调节,脉冲频率范围在 1~200 Hz,可调节。多接收器电感耦合等离子质谱仪为 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune 其离子光学通路采用能量聚焦和质量聚焦的双聚焦设计,并采用动态变焦(ZOOM)使质量色散达到 17%;仪器配有 9 个法拉第杯接收器和 4 个离子计数器接收器,除了中心杯和离子计数器外,其余 8 个法拉第杯配置在中心杯的两侧,并以马达驱动进行精确的位置调节,4 个离子计数器捆绑在 14 法拉第杯上[37]。

根据锆石的阴极发光、反射光和透射光照片选择合适的锆石进行打点,利用 193 nm 激光器对锆石进行剥蚀,通常采用的激光剥蚀的斑束直径为 35 μm ,激光能量密度为 13~14 J/cm^2 ,频率为 8~10 Hz,激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune,利用动态变焦扩大色散,同时接收质量数相差很大的 U-Pb 同位素从而进行锆石 U-Pb 同位素原位测定。采用 TEMORA 作为外部锆石年龄标准。采用标准锆石 GJ-1 作为年龄外标进行仪器 U、Pb 同位素分馏校正,以 NISTSRM610 玻璃标样作为元素外标计算锆石样品中的 U、Th、Pb 含量,采用 ICPMSDataCal8.3 程序[38]和 Kenneth R. Ludwig 的 Isoplot (Version3.76)程序进行数据处理、谐和图的绘制以及岩石结晶年龄的计算。

4. 分析结果

4.1. 地球化学特征

4.1.1. 主量元素

根据岩浆岩主量元素分析结果(见表 1),东乡粗面英安岩的 SiO_2 含量较高为 68.53%~70.34%。岩石贫镁钛(TiO_2 的含量为 0.25%~0.31%、 MgO 的含量为 2.07%~3.73%),高铁铝钾(Al_2O_3 的含量为 13.85%~15.58%、 Fe_2O_3 的含量为 1.1%~1.49%、 FeO 的含量为 2.07%~2.73%、 K_2O 含量为 6.6%~7.99%)。该岩石样品投全碱 SiO_2 - K_2O 图解显示(如图 4(a)),样品数据落在钾玄岩系列区域,全碱 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量为 9.26%~10.49%,属于钙碱性。在 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解中 $\text{A}/\text{NK} > 1$ 和 $\text{A}/\text{CNK} > 1$,属于过铝质(如图 4(b)),结合岩石主量元素分析,表明该地区粗面英安岩属于钙碱性系列,具有高硅、富钾和过铝质的特征。

4.1.2. 微量元素

东乡火山盆地粗面英安岩微量元素分析结果见表 1。其标准化蛛网图(如图 5(a))显示,粗面英安岩富集大离子亲石元素 Rb (196×10^{-6} ~ 264×10^{-6} 、Ba (1302×10^{-6} ~ 2247×10^{-6})、K (K_2O 6.6%~7.99%)、Pb (15.9×10^{-6} ~ 37.7×10^{-6}),明显亏损 Sr (53.3×10^{-6} ~ 186×10^{-6}),亏损高场强元素 Nb (18.1×10^{-6} ~ 19.10×10^{-6})、Ta (1.12×10^{-6} ~ 1.4×10^{-6})、Ti (TiO_2 0.25%~0.31%)、P (P_2O_5 0.04%~0.83%) (见表 1)。表明粗面英安岩可能为地壳部分熔融形成,大离子亲石元素优先进入岩体,而高场强元素因其不活泼性,被保留在残余固相中。Jahn 提出 Nb 的负异常的标志一般是典型地壳熔融后形成岩石[42],Sr 主要在富钙斜长石、磷灰石等矿物中赋存,Sr 的明显亏损,表明斜长石的分离结晶作用明显,这也符合稀土元素揭示的负 Eu 异常的结果[34]。东乡粗面英安岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式呈右倾型(如图 5(b)),粗面英安岩稀土元素总量 403.31×10^{-6} ~ 580.02×10^{-6} ,平均 441.53×10^{-6} ,样品的 LREE/HREE 值为 9.00~14.66,平均 12.93, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值 11.42~23.99,平均 20.38,表明样品相对较富集轻稀土元素(LREE),相对较亏损重稀土元素(HREE),轻稀土元素分馏较明显,重稀土元素分馏不明显。 δEu 值为 0.62~0.75,平均 0.70,所有样品都具有负 Eu 异常,表明可能都发生了斜长石的分离结晶作用。

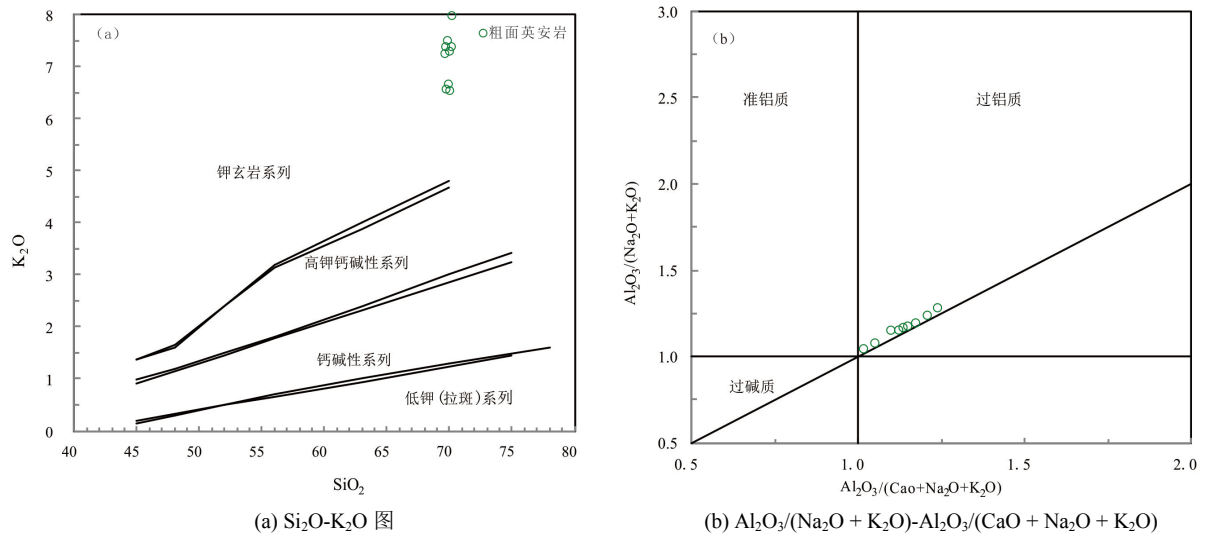


Figure 4. Discrimination diagrams of trachydacite
图 4. 粗面英安岩岩石判别图解[39] [40] [41]

4.2. 锆石测年结果

本文对东乡火山岩体中的粗面英安岩(DX079-Q1)和(DX085-Q4) 2 件样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析数据(见表 2)结果。这 2 个样品中的大多数锆石显示较好的生长纹带, 部分呈不完整的不规则棱角状或浑圆状, 有利于 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析。锆石的阴极发光图像显示(如图 6), 锆石

Table 2. Results of Zircon LA-ICPMS U-Pb dating from trachydacite
表 2. 粗面英安岩的锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果

样号	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb*		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U*		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U*		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 年龄		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄	
		比值	(±1σ)	比值	(±1σ)	比值	(±1σ)	(Ma)	(±1σ)	(Ma)	(±1σ)	(Ma)	(±1σ)
DX079-Q1: 粗面英安岩, 25 个测点, 加权平均年龄为 135.5 ± 2.1 Ma (MSWD = 3.6)													
1	0.2967	0.1165	0.0033	0.3792	0.0116	0.0236	0.0003	1902	51	326	10	150	2
2	0.3622	0.3305	0.0088	1.4201	0.0552	0.0312	0.0005	3619	41	897	35	198	3
3	0.8834	0.0649	0.0011	0.1952	0.0036	0.0218	0.0002	770	37	181	3	139	1
4	0.6969	0.4574	0.0110	2.7606	0.1006	0.0438	0.0009	4109	36	1345	49	276	6
5	0.4563	0.0693	0.0016	0.2077	0.0053	0.0217	0.0002	908	48	192	5	139	1
6	0.6044	0.1191	0.0024	0.4212	0.0091	0.0256	0.0003	1943	36	357	8	163	2
7	0.5994	0.1040	0.0025	0.3350	0.0097	0.0234	0.0002	1697	44	293	8	149	2
8	0.4247	0.1496	0.0037	0.4977	0.0147	0.0241	0.0003	2342	42	410	12	154	2
9	0.3994	0.3877	0.0090	1.8657	0.0657	0.0349	0.0006	3862	35	1069	38	221	4
10	0.4754	0.1558	0.0042	0.5168	0.0175	0.0241	0.0003	2410	45	423	14	153	2
11	0.4481	0.1593	0.0046	0.5282	0.0175	0.0241	0.0002	2448	49	431	14	153	2
12	0.3984	0.0666	0.0017	0.1962	0.0057	0.0214	0.0002	826	55	182	5	136	1
13	0.8856	0.1830	0.0058	0.6351	0.0272	0.0252	0.0003	2680	52	499	21	160	2
14	0.5451	0.2039	0.0037	0.7476	0.0171	0.0266	0.0003	2858	30	567	13	169	2
15	0.4300	0.1847	0.0055	0.6442	0.0225	0.0253	0.0003	2696	49	505	18	161	2
16	0.4871	0.1616	0.0046	0.5671	0.0192	0.0254	0.0003	2473	48	456	15	162	2
17	0.6678	0.2577	0.0067	0.9758	0.0368	0.0275	0.0004	3233	41	691	26	175	3
18	0.9264	0.1668	0.0035	0.6237	0.0149	0.0271	0.0003	2526	35	492	12	172	2
19	0.4846	0.0950	0.0029	0.3071	0.0105	0.0234	0.0002	1528	58	272	9	149	2

Continued

20	0.5119	0.1952	0.0035	0.5498	0.0112	0.0204	0.0002	2787	29	445	9	130	1
21	1.2191	0.1429	0.0028	0.4686	0.0101	0.0238	0.0002	2263	34	390	8	151	2
22	0.6916	0.3327	0.0070	1.5832	0.0565	0.0345	0.0006	3630	32	964	34	219	4
23	0.4424	0.2858	0.0073	1.1755	0.0441	0.0298	0.0004	3395	40	789	30	190	3
24	1.0107	0.1536	0.0045	0.5013	0.0168	0.0237	0.0003	2387	50	413	14	151	2
25	0.7174	0.2640	0.0082	1.0581	0.0505	0.0291	0.0005	3271	49	733	35	185	3
DX085-Q4: 粗面英安岩, 28 个测点, 加权平均年龄为 137.3 ± 2.3 Ma (MSWD = 7.8)													
1	0.3772	0.0841	0.0017	0.2735	0.0060	0.0236	0.0003	1294	38	246	5	150	2
2	0.4110	0.1370	0.0032	0.4513	0.0121	0.0239	0.0003	2189	41	378	10	152	2
3	0.6884	0.2324	0.0040	0.9278	0.0193	0.0289	0.0003	3069	28	666	14	184	2
4	0.7517	0.2535	0.0057	1.1528	0.0367	0.0330	0.0004	3207	36	779	25	209	3
5	0.4632	0.4563	0.0087	2.5924	0.1065	0.0412	0.0010	4106	28	1299	53	260	6
6	0.3636	0.0992	0.0015	0.3281	0.0056	0.0240	0.0002	1609	29	288	5	153	2
7	0.4161	0.1254	0.0032	0.4210	0.0124	0.0243	0.0003	2034	45	357	10	155	2
8	0.8151	0.1407	0.0039	0.4898	0.0155	0.0252	0.0003	2236	48	405	13	161	2
9	0.8038	0.3196	0.0054	1.6491	0.0320	0.0374	0.0004	3568	26	989	19	237	3
10	1.2793	0.1755	0.0049	0.7201	0.0246	0.0298	0.0004	2610	46	551	19	189	2
11	0.2432	0.0847	0.0035	0.2702	0.0116	0.0231	0.0002	1308	79	243	10	148	2
12	0.6474	0.0819	0.0030	0.2430	0.0092	0.0215	0.0002	1242	71	221	8	137	1
13	0.6830	0.0854	0.0048	0.2564	0.0145	0.0218	0.0002	1326	108	232	13	139	2
14	0.8340	0.0604	0.0044	0.1788	0.0129	0.0215	0.0002	617	158	167	12	137	2
15	0.7030	0.2085	0.0037	0.7602	0.0161	0.0264	0.0003	2894	29	574	12	168	2
16	0.7101	0.1536	0.0049	0.5073	0.0196	0.0240	0.0003	2386	54	417	16	153	2
17	0.7827	0.2988	0.0077	1.2409	0.0443	0.0301	0.0004	3464	40	819	29	191	3
18	0.3974	0.0866	0.0020	0.2654	0.0071	0.0222	0.0002	1351	45	239	6	142	1
19	0.5639	0.2297	0.0053	0.8626	0.0279	0.0272	0.0003	3050	37	632	20	173	2
20	0.4959	0.2197	0.0075	0.7990	0.0341	0.0264	0.0004	2979	55	596	25	168	2
21	0.6133	0.1368	0.0026	0.4600	0.0096	0.0244	0.0002	2187	33	384	8	155	2
22	0.5682	0.1023	0.0024	0.3398	0.0086	0.0241	0.0002	1667	43	297	7	153	2
23	0.6334	0.4587	0.0104	2.7757	0.1110	0.0439	0.0010	4114	34	1349	54	277	6
24	0.4153	0.4339	0.0077	2.3546	0.0776	0.0394	0.0008	4031	27	1229	40	249	5
25	0.5125	0.2488	0.0080	0.9694	0.0502	0.0283	0.0005	3177	51	688	36	180	3
26	0.9813	0.2312	0.0084	0.8740	0.0425	0.0274	0.0005	3061	58	638	31	174	3
27	0.6501	0.0849	0.0024	0.2625	0.0078	0.0224	0.0002	1314	54	237	7	143	1
28	0.5266	0.1107	0.0029	0.3401	0.0106	0.0223	0.0002	1812	48	297	9	142	1

无色透明, 多呈短柱状, 碎片状, 大小差异较明显, 长约 30~150 μm , 宽约 30~50 μm 不等, 多数锆石具有较为清晰的韵律环带结构, 具有岩浆锆石的特征。

上述 2 个样品共获得了 53 颗 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代数据结果(见表 2)和锆石 U-Pb 年龄谐和图, 粗面英安岩样品 DX079-Q1 中, 25 颗锆石的 Th/U 比值为 0.3~1.2, 全部测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 下交点结晶年龄为 135.5 ± 2.1 Ma (MSWD = 3.6) (如图 7(a))。粗面英安岩样品 DX085-Q4 中, 28 颗锆石的 Th/U 比值为 0.24~1.3, 全部测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 下交点结晶年龄为 137.3 ± 2.3 Ma (MSWD = 7.8) (如图 7(b))。该 2 件样品的结晶年龄代表了东乡火山盆地粗面英安岩的形成时代属于白垩世早期。

5. 讨论

5.1. 成岩时代

研究区域在构造上在近东西向萍乡 - 广丰深断裂和北东向赣东北深大断裂的交汇部位, 燕山期发生

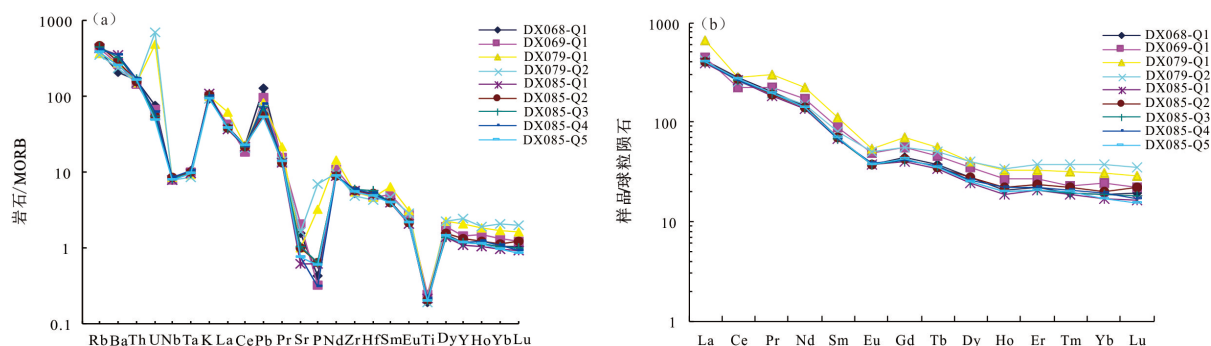


Figure 5. Chondrite-normalized REE patterns and primitive-mantle normalized trace element spider diagrams of trachydacite. (a) Primitive-mantle normalized trace element spider diagrams; (b) Chondrite-normalized REE patterns

图 5. 粗面英安岩稀土元素配分图和微量元素蛛网图[43]。(a) 微量元素原始地幔蛛网图；(b) 稀土元素化配分图

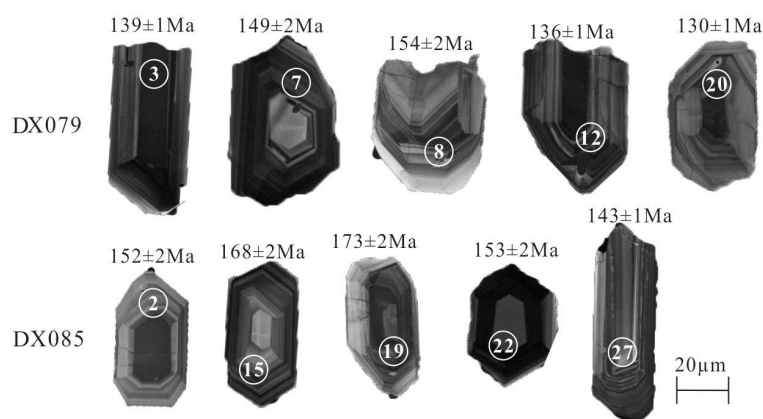


Figure 6. Analyzed locations and dating data for zircon U-Pb isotopes of trachydacite samples of (DX079-Q1) and (DX085-Q4)

图 6. 粗面英安岩样品(DX079-Q1)和(DX085-Q4)的锆石点位图

了大规模的岩浆活动，燕山期岩浆活动为该区域成矿带来了大量的成矿物质，成矿作用与早白垩世岩浆活动密切相关。例如，天华山火山盆地火山-侵入岩密切相关的冷水坑超大型 Ag-Pb-Zn 矿床，其中三个侵入岩体(石英正长斑岩、碱长花岗斑岩、流纹斑岩)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为(144 ± 1) Ma, (140 ± 1) Ma 和(140 ± 1) Ma, 均于早白垩世[31]成于 132 Ma ± 0.4 Ma [44]。样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明，锆石年龄集中分布于 130~180 Ma 区间(见表 2)，在协和图上，粗面英安岩样品 DX079-Q1 中，25 颗锆石的 Th/U 比值为 0.3~1.2，全部测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 下交点结晶年龄为 135.5 ± 2.1 Ma (MSWD = 3.6)。粗面英安岩样品 DX085-Q4 中，28 颗锆石的 Th/U 比值为 0.24~1.3，全部测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 下交点结晶年龄为 137.3 ± 2.3 Ma (MSWD = 7.8)。锆石的阴极发光图像显示(图 4)，锆石无色透明，多呈短柱状，碎片状，大小差异较明显，长约 30~150 μm ，宽约 30~50 μm 不等，多数锆石具有较为清晰的韵律环带结构，具有典型的岩浆锆石的特征，且有可能被后期流体改造。结合测试点都分布在协和图上的特点，说明样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄代表了粗面英安岩的结晶年龄，证明了成岩时代与燕山期东乡火山盆的岩浆活动时间基本一致。另外，Hui-Min Su 等[45]研究的江西梨子坑火山岩盆地辉长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 129 ± 2 Ma (成岩年龄)和花岗斑岩形成于 132 ± 1 Ma (成岩年龄)；Long Chen 等[46]提出华南庐纵地区安山岩-玄武岩火山喷发在 127 ± 2 ~ 137 ± 1 Ma 间；江南东段九岭尖矿集区与莲花山矿田钨锡矿床成矿花岗岩与成矿年龄主要在 146~136 Ma 间[47]。表明与华南地区早白垩世的火山活动相契合。

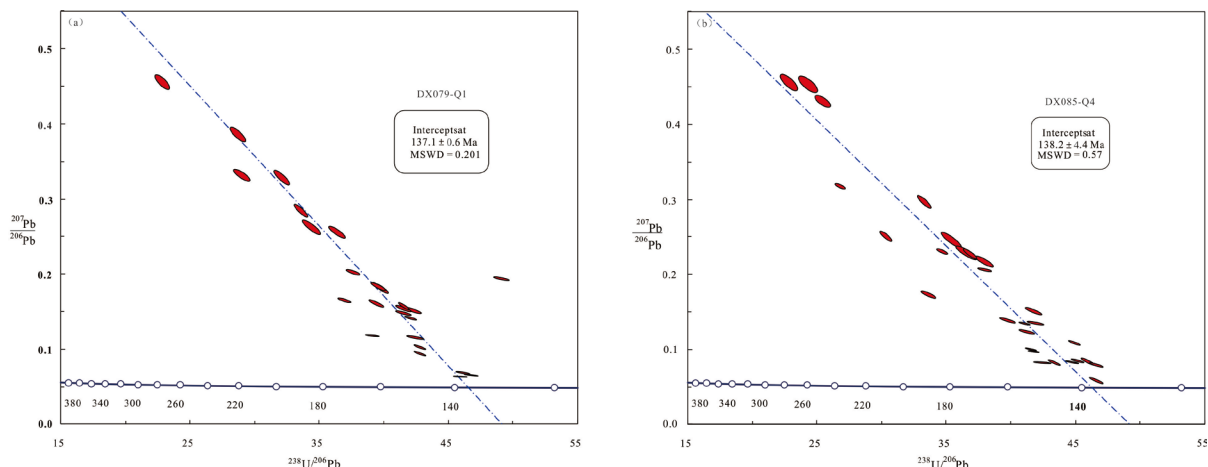


Figure 7. Zircon U-Pb age Tera-wasserburg concordance of DXO79-Q1 and DXO85-Q4 trachydacite
图 7. 粗面英安岩 DXO79-Q1 和 DXO85-Q4 的锆石 U-Pb 年龄 Tera-wasserburg 谐和图

5.2. 岩石成因

东乡火山岩盆地粗面英安岩属于钾玄岩系列，相对富铁铝，贫镁钛，且有多条细石英脉，使得 SiO_2 含量偏高。在镜下观察斑晶表面较脏，而且该地区风化蚀变作用较强烈，岩石主要发生了高岭土化和少量绢云母化(有铁质矿化)。粗面英安岩在化学成分上富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量 9.26%~10.49%，富钾($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$)的含量为 0.28%~0.44%，贫钛 TiO_2 的含量 0.25%~0.31%，铝含量高但变化范围大($w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 13.85\% \sim 15.58\%$)， $w(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO})$ 值高 0.51%~0.55%，富轻稀土和大离子亲石元素(Rb、Ba、Th、Pb)，贫高场强元素(Nb、Sr)。所以，这完全符合 Morrison [48]对钾玄质火山岩的地球化学的总结特征：化学成分上富碱($w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) > 5\%$)、富钾($w(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) < 0.6$)、贫钛($w(\text{Ti}_2\text{O}) < 1.3\%$)、铝含量高但变化范围大($w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 14\% \sim 19\%$)， $w(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO})$ 值高(>0.5)，富轻稀土和大离子亲石元素(如 Rb、Ba、Th、Pb 等)，贫高场强元素(如 Nb、Zr 等)。大离子亲石元素优先进入粗面英安岩中，而不活泼的高场强元素被保留在残余固相中。粗面英安岩显示 Ta、Nb 和 Ti 具有“TNT”负异常，表明在岩浆分异过程中，继承了原始岩浆中微量元素的特征，并伴有铁钛氧化物的分离结晶作用[49]。粗面英安岩中 K 和 Pb 具有正异常的特征，反映了钾族元素的富集且不随岩浆分异程度而变化；也存在相容元素十分贫化的现象，这一特点又反应了它可能较强烈的分离结晶参与的特点，因为纯粹的同化混染作用也不可能造成相容元素的强烈贫化[50]。

从岩石地球化学特征可以看出：在 K-Na-Ca 图解(如图 8(a))上可以看出，花岗样品的投点主要落在具有钙碱性趋势的岛弧岩石范围内，样品没有显示出与奥长花岗岩趋势和 Adakite 岩范围。表明该岩石在岛弧环境特征下的粗面英安岩。Taylor [51]认为，地球演化过程中 K 和 Rb 不断向上迁移进入硅铝层，而上地幔越来越亏损 K 和 Rb，Rb 富集于成熟度高的地壳中，而 Sr 和 Ca 在成熟度低、演化不充分的地壳中富集，因此，Rb/Sr 值能较好地记录源区物质的性质，可利用 Rb/Sr 和 Rb/Ba 的关系来确定源区成分。在 Rb/Ba-Rb/Sr 图解(如图 8(b))中，岩体样品点基本全部分布在贫粘土源岩区的砂质岩区，表明其源区成分为砂质岩类，也就是说源区岩石可能是以砂岩的部分熔融为主，也暗示岩浆的演化程度较高。另外，稀土元素球粒陨石标准化分布曲线分配模式呈右倾型，相对富集轻稀土元素(LREE)，相对较亏损重稀土元素(HREE)，轻稀土元素分馏较明显，重稀土元素分馏不明显。一般认为，岩浆的熔融程度越高，其熔浆中的稀土元素含量越低，轻重稀土分馏的程度也就越弱，岩浆中稀土元素的含量也就越高，轻重稀土的分馏就越强，La 更容易进入液相中，导致 La/Yb 的比值就越大。因此，负 Eu 异常是因为地壳源区在部分熔融过程中，很有可能是斜长石难熔而呈残留固相造成的。

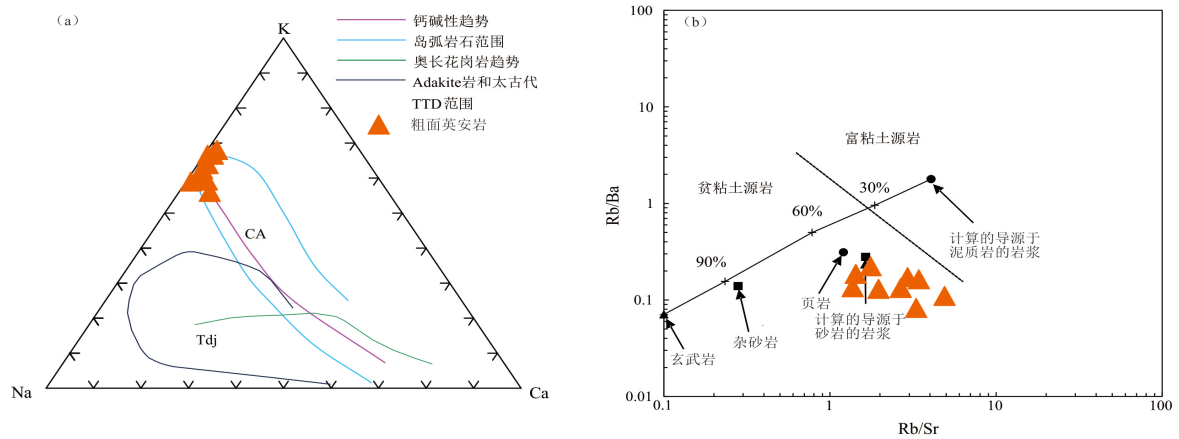


Figure 8. (a) K-Na-Ca diagram; (b) Rb/Ba-Rb/Sr diagram
图 8. (a) K-Na-Ca 图解[52]; (b) Rb/Ba-Rb/Sr 图解[53]

钾玄岩系列(组分)主要分布在岛弧和活动大陆边缘、远离俯冲带,它在造山带火山岩中具有重要地位,造山带火山岩的成分以 TiO_2 含量低为基本特征[50]。发育高钾钙碱性系列火成岩的造山带具正常→加厚的陆壳,而以钾玄系列为主的造山带一定具有山根[54]。Müller and Groves [55]将其形成的大陆动力学背景进行了归纳总结:大陆弧(Continental Arc)、碰撞后弧(Post-collisional Arc)、初始洋弧(Initial Oceanic Arc)、晚期洋弧(Late Oceanic Arc)和板内(Within-plate)五种环境。产出于弧构造背景下的钾质火成岩与俯冲板块析出流体交代地幔岩密切相关[56]。富钾火山岩主要发育于岛弧环境,是形成时间较晚并远离海沟的岛弧火山岩系列之一,也见于活动大陆边缘和地缝合线两侧少数出现于裂谷带[57] [58]。对富钾火山岩的成因认识最主要是与俯冲作用有关的构造背景,更大程度上还受到了俯冲陆壳及其析出流体的混染和交代作用[59]。斐济 Tavua 钾玄质火山岩富 Rb、Ba、K 和 Pb 等元素的特征被认为是俯冲大洋岩石圈析出流体产生的源区富集事件所致[60]。Allcl 等[61]对土耳其西南部 Goilcuk 地区钾质火山岩和 Chung 等[62]对台湾新生代的高钾质火山岩的研究表明,钾质火山岩具特殊地球化学特征的主要原因是俯冲沉积物和俯冲板块析出流体在地幔源区的混染与交代作用。Massonne [63]通过 $\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ (KMASH)体系的实验研究表明作为俯冲洋壳中少量的富钾变沉积物在 $t = 300^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$, $P = 15\sim 30 \text{ kbar}$ 的条件下能产生超钾质流体。因此,高钾钙碱性岩浆单独通过地壳深熔作用形成的可能性不大,如果没有地幔物质的参与也难以作为地壳深熔作用产生高钾钙碱性岩浆提供足够的热能[64] [65]。

5.3. 构造环境

燕山期中国东部地区大地构造总体上分为两种认识:① 与太平洋俯冲有关[66]-[71];② 与太平洋俯冲无关的陆内造山与伸展裂谷[72] [73] [74] [75]。华南地区 Pt_1 以来,发生过两次重要的洋陆分布格局的重组,三叠纪之前为沟-弧-盆发育的构造模式,侏罗纪-白垩纪是东部大陆边缘弧与西部陆内俯冲的洋陆会聚发育的构造模式,新生代则是西太平洋沟-弧-盆发育的构造模式[76]。华南中生代挤压向拉张构造转换的重要时间是 150~140 Ma;燕山晚期(140~120 Ma)岩浆大爆发是华南地区最重要的构造热事件,也是伸展构造活动的重要标志[13]。燕山晚期,华南地区构造背景逐渐由挤压转换为伸展,大量的软流圈物质上涌,板片脱水所引起地幔楔熔融形成底侵的玄武质岩浆,激发地壳大规模重熔[77] [78]。狄永军等[79]提出中国东南部地区火成岩在燕山期受 Izanagi 板块向欧亚板块之下俯冲,导致地壳缩短加厚,发生拆沉作用,岩石圈减薄,玄武岩岩浆底侵,直接加热中下地壳,使之部分熔融形成酸性岩浆。在 $\log t-\log \sigma$ 图解显示(如图 9(a)),该组数据落入造山带(岛弧及大陆边缘区)火山岩附近,表明粗面英安岩主要形成造山带环境。在 $\text{Hf-Rb}/30-\text{Ta} \times 3$ 图解显示(如图 9(b)),该组数据全部弧系统构造环境范围内,表明粗面英安

岩形成于火山弧构造环境中。在(Ta + Yb)-Rb、Yb-Ta 构造环境判图解中图解更明确显示(如图 9(c)、图 9(d))，大部分数据主要落在火山弧环境和同碰撞的界限附近。显示粗面英安岩形成于弧系统的同碰撞大地构造环境，其可能形成于板块碰撞结合带环境的陆内造山阶段，与古太平洋板块向欧亚板块大陆俯冲作用有关。

在燕山期俯冲大洋板块发生了裂解、拆沉，软流圈强烈上涌，导致了大规模的板内岩浆活动。岩浆由地幔上升，地壳大量混染受热部分熔融[80]。晚燕山时期发生强烈的板片俯冲，随着俯冲角度的加大或板片后撤[81]，白垩纪时期扬子板块向华北板块的俯冲作用产生的富集地幔部分熔融与玄武质熔体发生混染作用[82]。因此，地球化学特征显示该区花岗斑岩形成于弧系统的同碰撞大地构造环境，是可信的。这也符合 Xiao 等[83]提出的在燕山期(175~140 Ma)时，太平洋板块的俯冲成为主导构造体系，古太平洋板块的低角度俯冲促进了俯冲洋壳和地幔基底的部分熔化；随着俯冲板块倾角的增大，大陆弧构造背景转变为弧后延伸，导致下地壳的强烈部分熔化。在大地构造位置上，东乡火山盆地受赣东北深断裂带和广丰 - 萍乡深断裂控制，而这两条断裂带切入到下地壳，因此东乡岩体的形成过程中可能存在地壳物质的参与。综上所述，笔者认为燕山晚期东乡火山盆地为俯冲造山环境，古太平洋板块向欧亚板块俯冲作用，导致地壳加厚，地幔岩浆上升，下地壳受热而引起部分熔融，下部产生的玄武岩系列岩浆经同化混染作用形成英安岩系列的岩浆。

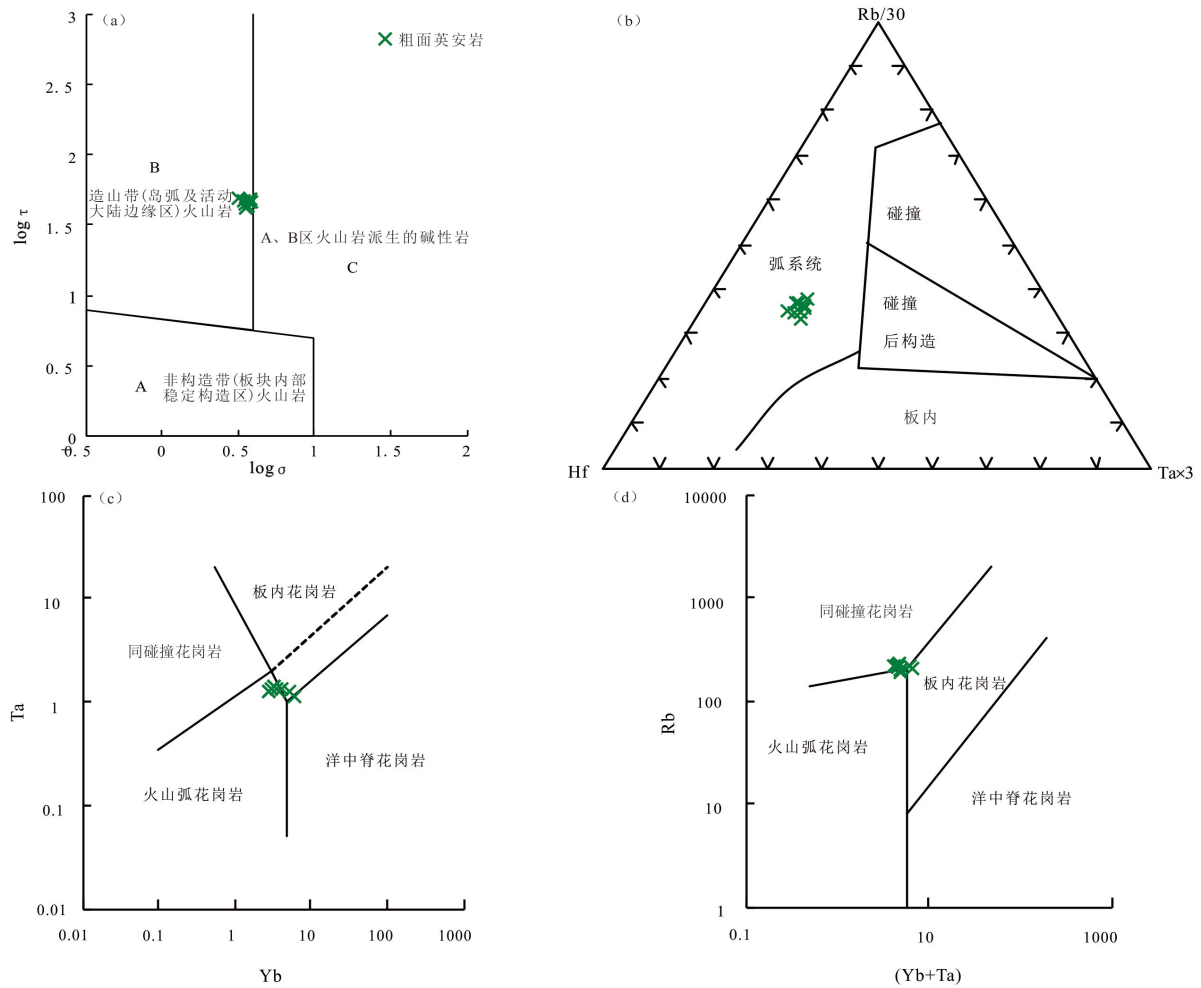


Figure 9. Tectonic setting discrimination diagrams of trachydacite. (a) Log τ -log σ diagram; (b) Hf-Rb/30-Ta \times 3 diagram; (c) Ta-Yb discrimination diagrams; (d) Ta + Yb-Rb discrimination diagrams

图 9. 粗面英安岩构造判别图解[84] [85] [86]。(a) log τ -log σ 图解；(b) Hf-Rb/30-Ta \times 3 图解；(c) Ta-Yb 图解；(d) Ta + Yb-Rb 图解

6. 结论

1) 东乡火山盆地的粗面英安岩属于高钾钙碱性喷出岩,粗面英安岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄显示从 135.5 ± 2.1 Ma 到 137.3 ± 2.3 Ma 之间,表明东乡火山盆地粗面英安岩的形成时代属于早白垩世。

2) 燕山晚期东乡火山盆地为俯冲造山环境,与古太平洋板块向欧亚板块的俯冲作用有关。区域地质特征及岩体地球化学特征表明,地幔岩浆上升,使地壳受热而引起部分熔融,下部产生的玄武质岩浆经同化混染作用可形成英安质岩浆。

致 谢

感谢本文依托《北武夷成矿带东乡浩家岭-上饶梨子坑铜多金属矿成矿规律调查》(项目编号 1212011220557)项目的支持;感谢两位匿名审稿人对文稿提出的非常具有建设性的评审意见;感谢中国地质大学(北京)程素华副教授、中国地质大学(北京)崔晓亮博士和中国地质大学(北京)贺晓龙博士提出的宝贵修改意见。

参考文献

- [1] Xu, J.W., Zhu, G., Tong, W.X., Cui, K. and Liu, Q. (1987) Formation and Evolution of the Tancheng-Lujiang Wrench Fault System: A Major Shear System to the Northwest of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, **134**, 273-310. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90342-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90342-8)
- [2] Xu, J.W., Ma, G.F., Tong, W.X., Zhu, G. and Lin, S.F. (1993) Displacement of the Tancheng-Lujiang Wrench Fault System and Its Geodynamic Setting in the Northwestern Circum-Pacific. In: Xu, J.W., Ed., *The Tancheng-Lujiang Wrench Fault System*, John Wiley and Sons, Chichester, 51-74.
- [3] Lapierre, H., Jahn, B.M., Charvet, J. and Yu, Y.W. (1997) Mesozoic Felsic Arc Magmatism and Continental Olivine Tholeiites in Zhejiang Province and Their Relationship with the Tectonic Activity in Southeastern China. *Tectonophysics*, **274**, 321-338. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00009-7)
- [4] 周新民, 李武显. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式[J]. 自然科学进展, 2000, 10(3): 240-247.
- [5] 王德滋, 周新民. 中国东南部晚中生代花岗质火山——侵入杂岩成因与地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [6] Zhou, X.M. and Li, W.X. (2000) Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas. *Tectonophysics*, **326**, 269-287. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00120-7)
- [7] Zhou, X.M., Sun, T., Shen, W.Z., Shu, L.S. and Niu, Y.L. (2006) Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, **29**, 26-33. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2006/v29i1/004>
- [8] Zhang, B., Guo, F., Zhang, X.B., Wu, Y.M., Wang, G.Q. and Zhao, L. (2019) Early Cretaceous Subduction of Paleo-Pacific Ocean in the Coastal Region of SE China: Petrological and Geochemical Constraints from the Mafic Intrusions. *Lithos*, **334-335**, 8-24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.010>
- [9] Wang, Y.J., Fan, W.M., Guo, F., Peng, T.P. and Li, C.W. (2003) Geochemistry of Mesozoic Mafic Rocks Adjacent to the Chenzhou-Linwu Fault, South China: Implications for the Lithospheric Boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks. *International Geology Review*, **45**, 263-286. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.45.3.263>
- [10] Wang, Y.J., Fan, W.M., Peng, T.P. and Guo, F. (2005) Elemental and Sr-Nd Isotopic Systematics of the Early Mesozoic Volcanic Sequence in Southern Jiangxi Province, South China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *International Journal of Earth Sciences*, **94**, 53-65. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0441-4>
- [11] Wang, Y.J., Fan, W.M., Sun, M., Liang, X.Q., Zhang, Y.H. and Peng, T.P. (2007) Geochronological, Geochemical and Geothermal Constraints on Petrogenesis of the Indosinian Peraluminous Granites in the South China Block: A Case Study in the Hunan Province. *Lithos*, **96**, 475-502. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.11.010>
- [12] 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 等. 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, 2003, 10(3): 159-169.
- [13] 宋传中, 李加好, 严加永, 等. 华南大陆东部若干构造问题的思考[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 704-722.
- [14] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 636-658.

- [15] 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 等. 华南地区中生代主要金属矿床模型[J]. 地质论评, 2009, 55(3): 347-354.
- [16] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 510-526.
- [17] 毛建仁, 胡青, 叶海敏, 等. 武夷山成矿带构造——岩浆作用与成矿[J]. 矿物学报, 2011(S1): 81-93.
- [18] 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 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, 2014, 44(12): 2593-2617.
- [19] 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 等. 华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(2): 219-229.
- [20] 华嵘辉, 吴德来, 余祖寿, 等. 江西上饶黄柏坑铅锌(铜银)矿床地质特征及找矿标志[J]. 福建地质, 2008, 27(4): 361-368.
- [21] 罗平, 吴淦国, 张达, 等. 北武夷生米坑铅锌矿床地质地球化学特征与成因探讨[J]. 地质力学学报, 2009, 15(4): 349-362.
- [22] 江西省地质矿产局 912 大队. 东乡县幅 H50E0230111: 5 万地质图说明书[M]. 地矿部江西地质矿产勘查开发局测绘大队, 1993.
- [23] 张利民. 从信江盆地新资料论侏罗、白垩系的界线[J]. 地质评论, 1991, 37(4): 310-318.
- [24] 代堰铭, 余心起, 吴淦国, 等. 北武夷蔡家坪铅锌矿床硫化物特征、矿产成因类型及成矿时代[J]. 地学前缘, 2011, 18(2): 321-338.
- [25] Wang, C.M., Zhang, D., Wu, G.G., Xu, Y.G., Carranza, E.J.M., Zhang, Y.Y., Li, H.K. and Geng, J.Z. (2013) Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Rhyolitic Tuff, Granite Porphyry and Syenogranite in the Lengshuikeng Ore District, SE China: Implications for a Continental Arc to Intra-Arc Rift Setting. *Journal of Earth System Science*, **122**, 809-830. <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0302-2>
- [26] Su, H.M., Mao, J.W., He, X.R. and Lu, R. (2013) Timing of the Formation of the Tianhuashan Basin in Northern Wuyi as Constrained by Geochronology of Volcanic and Plutonic Rocks. *Science China (Earth Sciences)*, **56**, 940-955. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4610-9>
- [27] Zhou, J., Jiang, Y.H., Xing, G.F., Zeng, Y. and Ge, W.Y. (2013) Geochronology and Petrogenesis of Cretaceous A-Type Granites from the NE Jiangnan Orogen, SE China. *International Geology Review*, **55**, 1359-1383. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.774199>
- [28] 郭博然, 刘树文, 杨朋涛, 等. 江西卧龙谷花岗岩和铜厂花岗闪长斑岩的地球化学特征及成因——对赣东北地区铜矿成矿地质背景的制约[J]. 地质通报, 2013, 32(7): 1035-1046.
- [29] 李晓峰, 华仁民, 马东升, 等. 大陆岩石圈伸展与斑岩铜矿成矿作用[J]. 岩石学报, 2019, 35(1): 76-88.
- [30] Guo, C.L., Mao, J.W. and Chen, Y.C. (2010) Zircon SHRIMP U-Pb Dating Geochemistry Sr-Nd-Hf Isotopic Analysis of the Yingqian Intrusion in Jiangxi Province, South China and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, **26**, 919-937.
- [31] 苏慧敏, 毛景文, 何细荣, 等. 北武夷天华山盆地形成时限的约束: 来自火山岩-侵入岩的年代学证据[J]. 中国科学(地球科学), 2013, 43(5): 745-759.
- [32] 周先军, 李淑琴, 陈立泉. 江西东乡火山盆地成矿规律及找矿方向探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 45-51.
- [33] 晏俊灵, 江俊杰, 张娟, 等. 江西省东乡火山岩区成矿地质、地球化学特征及找矿潜力[J]. 物探与化探, 2012, 36(4): 534-538.
- [34] 欧阳学财, 狄永军, 张达, 等. 江西东乡花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 2016, 35(11): 1869-1883.
- [35] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 552-558.
- [36] 周振华, 欧阳荷根, 武新丽, 等. 内蒙古达拉特坝铜钨多金属矿黑云母花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 79-94.
- [37] 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报, 2009, S1: 600-601.
- [38] Liu, Y.S., Hu, Z.C. and Gao, S. (2008) *In Situ* Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, **257**, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- [39] Peccerillo, R. and Taylor, S.R. (1976) Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu

- Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **58**, 63-81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>
- [40] Middlemost, E.A.K. (1985) *Magma and Magmatic Rocks*. Longman, London, 1-266.
- [41] Maniar, P.D. and Piccoli, P.M. (1989) Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, **101**, 635-643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2)
- [42] Jahn, B.W., Wu, F.Y. and Hong, D.W. (2000) Important Crustal Growth in the Phanerozoic: Isotopic Evidence of Granitoids from the East-Central Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, **109**, 5-20. <https://doi.org/10.1007/BF02719146>
- [43] Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and Isotope Systematics of Oceanic Basalts Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D., Ed., *Magmatism in Ocean Basins*, Geol. Soc. Publication, Vol. 42, 313-3456. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- [44] 兰正卿. 江西省东北部矿物富集区地球化学与年代学研究[J]. 世界有色金属, 2019(17): 248-250.
- [45] Su, H.M., Jiang, S.Y., Cao, M.Y. and Luo, P. (2019) Rare-Metal Mineralization Potential and Petrogenesis of Early Cretaceous I-Type Granitic Rocks in the Lizikeng Volcanic Basin of Jiangxi Province, South China: Evidence from Mineralogy, Geochemistry, and Geochronology. *Mineralium Deposita*, **55**, 453-468. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00894-4>
- [46] Chen, L., Zhao, Z.F. and Zheng, Y.F. (2013) Origin of Andesitic Rocks: Geochemical Constraints from Mesozoic Volcanics in the Luzong Basin, South China. *Lithos*, **190-191**, 220-239. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.011>
- [47] 杨明桂, 王光辉. 华南陆区板块活动与构造体系的形成演化[J]. 地质学报, 2019, 39(3): 528-544.
- [48] Morrison, G.W. (1980) Characteristics and Tectonic Setting of the Shoshonite Rock Association. *Lithos*, **13**, 97-108. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(80\)90067-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(80)90067-5)
- [49] 徐义刚, 何斌, 罗震宇, 等. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(1): 25-39.
- [50] 邓晋福, 叶德隆, 赵海玲, 等. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1-184.
- [51] Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1986) The Chemical Composition of the Archaean Crust (in the Nature of the Lower Continental Crust). *Geological Society Special Publications*, **24**, 173-178. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.024.01.16>
- [52] Nockolds, S.R. and Allen, R. (1953) The Geochemistry of Some Igneous Rock Series. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **4**, 105-142. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(53\)90055-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(53)90055-6)
- [53] Sylvester, P.J. (1998) Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, **45**, 29-44. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00024-3)
- [54] 邓晋福, 罗照华, 莫宣学, 等. 岩石成因、构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1-381.
- [55] Müller, D. and Groves, D.I. (2018) *Potassic Igneous Rocks and Associated Gold-Copper Mineralization*. 5nd Edition, Springer Verlag, Berlin, 1-125.
- [56] Zhao, Z.D., Mo, X.X., Dilek, Y., Niu, Y.L., DePaolo, D.J., Robinson, P., Zhu, D.C., Sun, C.G., Dong, G.C., Zhou, S., Luo, Z.H. and Hou, Z.Q. (2009) Geochemical and Sr-Nd-Pb-O Isotopic Compositions of the Post-Collisional Ultrapotassic Magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and Implications for India Intra-Continental Subduction beneath Southern Tibet. *Lithos*, **113**, 190-212. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.02.004>
- [57] Foley, S. and Peccerillo, A. (1992) Potassic and Ultrapotassic Magmas and Their Origin. *Lithos*, **28**, 181-185. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(92\)90005-J](https://doi.org/10.1016/0024-4937(92)90005-J)
- [58] Muller, D., Rock, N.M.S. and Groves, D.I. (1992) Geochemical Discrimination between Shoshonitic and Potassic Volcanic Rocks from Different Tectonic Settings: A Pilot Study. *Mineral Petrol*, **46**, 259-289. <https://doi.org/10.1007/BF01173568>
- [59] 邱检生, 徐夕生, 蒋少涌. 地壳深俯冲与富钾火山岩成因[J]. 地学前缘, 2003(3): 191-201.
- [60] Rogers, N.W. and Setterfield, T.N. (1994) Potassium and Incompatible-Element Enrichment in Shoshonitic Lavas from the Tavua Volcano, Fiji. *Chemical Geology*, **118**, 43-62. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90169-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90169-4)
- [61] Allcl, P.A., Gourdaud, A., et al. (1998) Petrology and Geochemistry of Potassic Rocks in the Golcuk Area (Isparta SW Turkey): Genesis of Enriched Alkaline Magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **85**, 423-446. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00065-1)
- [62] Chung, S.L., Wang, K.L., Crawford, A.J., et al. (2001) High-Mg Potassic Rocks from Tai Wan: Implications for the Genesis of Orogenic Potassic Lavas. *Lithos*, **59**, 153-170. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(01\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00067-6)
- [63] Massonne, H.J. (1992) Evidence for Low-Temperature Ultrapotassic Siliceous Fluids in Subduction Zone Environ-

ments from Experiments in the System K_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O (KMASH). *Lithos*, **28**, 421-434.

[https://doi.org/10.1016/0024-4937\(92\)90017-S](https://doi.org/10.1016/0024-4937(92)90017-S)

- [64] 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 等. 湘东南中生代花岗闪长质小岩体的岩石地球化学特征[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 169-175.
- [65] Miller, C., Schuster, R., Klotzli, U., et al. (1999) Post-Collisional Potassic and Ultrapotassic Magmatism in SW Tibet: Geological and Sr-Nd-Pb-O Isotopic Constraints for Mantle Source Characteristics and Petrogenesis. *Journal of Petrology*, **40**, 1399-1424. <https://doi.org/10.1093/ptro/40.9.1399>
- [66] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根柱构造大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-110.
- [67] Li, X.H., Li, W.X., Li, Z.X., Lo, C.H., Wang, J., Ye, M.F. and Yang, Y.H. (2009) Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Block in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb Zircon Ages, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes of the Shuangxiwu Volcanic Rocks. *Precambrian Research*, **147**, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.07.004>
- [68] 周新民. 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, 2007: 1-691.
- [69] Sun, W.D., Yang, X.Y., Fan, W.M. and Wu, F.Y. (2012) Mesozoic Large Scale Magmatism and Mineralization in South China: Preface. *Lithos*, **150**, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.028>
- [70] 冯艳芳, 邓晋福, 肖庆辉, 等. 长乐-南澳构造带花岗岩的年代学, 岩石组合与构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-168.
- [71] 毛建仁, 邢光福, 叶海敏, 等. 中国东南部及邻区中生代岩浆作用与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-524.
- [72] 李兆薰, 李之彤, 李汉声, 等. 中国东部中生代火成岩及其深部过程[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-357.
- [73] Wang, Q., Xu, J.F., Jian, P., Bao, Z.W., Zhao, Z.H., Li, C.F., Xiong, X.L. and Ma, J.L. (2006) Petrogenesis of Adakitic Prophyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China: Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization. *Journal of Petrology*, **47**, 119-144. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egi070>
- [74] 张旗, 李承东. 花岗岩: 地球动力学意义[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 1-276.
- [75] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学, 2013, 43(10): 1553-1582.
- [76] 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 华南地区侵入岩时空演化框架[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 3-16.
- [77] 吕劲松, 张雪辉, 孙建东, 等. 钦杭成矿带东段燕山期中酸性岩浆活动时空演化与成矿规律[J]. 岩石学报, 2017, 33(11): 3635-58.
- [78] 刘磊. 中国东南部晚中生代幕式火山岩浆作用及古太平洋板块俯冲机制[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京大学, 2015.
- [79] 狄永军, 徐贻麟, 吴淦国, 等. 江西冷水坑银铅锌矿田推覆构造的形成时代: 来自年代学的约束[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 340-349.
- [80] Li, Z.X. and Li, X.K. (2007) Formation of the 1300 km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, **35**, 179-182. <https://doi.org/10.1130/G23193A.1>
- [81] Li, Z.X., Li, X.H., Chung, S.L., Lo, C.H., Xu, X.S. and Li, W.X. (2012) Magmatic Switch-On and Switch-Off along the South China Continental Margin since the Permian: Transition from an Andean-Type to a Western Pacific-Type Plate Boundary. *Tectonophysics*, **532-535**, 271-290. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.02.011>
- [82] Liu, Z., Yang, X.Y., Liu, C.M., Huang, D.Z., Zhou, W.J., Xia, T., Liang, E.Y. and Dai, T.G. (2018) Genesis of Early Cretaceous Porphyrite-Type Iron Deposits and Related Sub-Volcanic Rocks in the Ningwu Volcanic Basin, Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt, Southeast China. *International Geology Review*, **60**, 1507-1528. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1419883>
- [83] Xiao, Z., Wang, S., Qi, S., Kuang, J., Zhang, M., Tian, F. and Han, Y. (2019) Petrogenesis, Tectonic Evolution and Geothermal Implications of Mesozoic Granites in the Huangshadong Geothermal Field, South China. *Journal of Earth Science*, **1674**, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1242-9>
- [84] Gottini, V. (1968) Serial Character of the Volcanic Rocks of Pantelleria. *Bulletin Volcanologique, Tome*, **33**, 818-827. <https://doi.org/10.1007/BF02596751>
- [85] Harris, N.B.W., Marzouki, F.M.H. and Ali, S. (1986) The Jabel Sayd Complex, Arabian Shield: Geochemical Constraints on the Origin of Peralkaline and Related Granites. *Geological Society of London*, **143**, 287-295. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0287>
- [86] Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G. (1984) Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, **25**, 956-983. <https://doi.org/10.1093/ptrology/25.4.956>