



引文格式: 贾彬, 吴欢欢, 魏立勇, 等. 南秦岭紫阳-镇坪地区基性岩墙和碱性火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 291-307. DOI: 10.12401/j.nwg.2024065

Citation: JIA Bin, WU Huanhuan, WEI Liyong, et al. Zircon U-Pb Chronology Geochemical Characteristics and Geological Significance of Alkaline Mafic Dikes and Intermediate Volcanic Rocks in the Ziyang-Zhenping Area of South Qinling[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 291-307. DOI: 10.12401/j.nwg.2024065

南秦岭紫阳-镇坪地区基性岩墙和碱性火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义

贾彬^{1,2}, 吴欢欢^{1,2,3,*}, 魏立勇^{1,2}, 张振^{1,2}, 孟五一^{1,2}, 郑鑫^{1,2}, 刘宁波^{1,2}, 李先晨^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 2. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100038)

摘要: 南秦岭大巴山地区红椿坝-曾家坝断裂带两侧出露一条由超基性、基性岩墙群和碱性火山岩组成的碱性岩浆岩带。笔者对紫阳-镇坪地区粗面质火山岩开展锆石 U-Pb 年代学研究, 结果表明 4 件粗面质火山岩成岩年龄为 442~439 Ma, 为早志留世喷发, 与区内基性岩墙为同一时期岩浆作用的产物。对碱性粗面质火山岩及区内与其相伴出现的辉绿岩进行了全岩化学分析, 结果表明粗面岩相对高 Si(SiO_2 含量为 59.1%~65.4%), 富碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 8.40%~11.4%), 低 Ca(CaO 含量为 0.35%~1.89%)、Mg(MgO 含量 0.64%~3.31%) 和 Ti(TiO_2 含量为 0.74%~1.67%), 富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 指示其经历了较高级的演化。接近原始地幔的高 Nb/U 值($=39.9\sim112$, 平均为 58.8)和 Nb/Ta 值($=15.7\sim43.9$, 平均为 19.9), 表明碱性粗面质火山岩和基性岩墙均有幔源属性。粗面质火山岩 Nb/Th=10.5、Th/Yb=3.9、Nb/Ta=20.0、Th/U=5.7 值与辉绿岩(分别为 11.7、1.6、19.6、5.8)相近, 指示它们为同源岩浆经历不同程度分离结晶的产物。综合区域年代学、地球化学和构造地质背景, 笔者认为紫阳-镇坪地区早古生代碱性火山岩与基性岩墙(脉)形成于大陆板内伸展构造背景下裂谷环境中, 均来源于上地幔部分熔融产生的玄武质初始岩浆, 并经历不同程度分离结晶作用演化而来。

关键词: 碱性火山岩; 锆石 U-Pb 定年; 粗面质火山岩; 早志留世; 裂谷

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0291-17

Zircon U-Pb Chronology Geochemical Characteristics and Geological Significance of Alkaline Mafic Dikes and Intermediate Volcanic Rocks in the Ziyang-Zhenping Area of South Qinling

JIA Bin^{1,2}, WU Huanhuan^{1,2,3,*}, WEI Liyong^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2}, MENG Wuyi^{1,2},
ZHENG Xin^{1,2}, LIU Ningbo^{1,2}, LI Xianchen^{1,2}

(1. Xi'an Mineral Resources Survey Center, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Technology Innovation Center for

收稿日期: 2023-08-24; 修回日期: 2024-03-15; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 自然资源综合调查指挥中心科技创新基金(KC2024007), 中国地质调查局项目“南秦岭旬北地区金锑找矿靶区优选与评价”(DD20230370), 陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目“南秦岭粗面岩型铌矿富集机制研究: 以双河口大型铌矿床为例”(2023-JC-QN-0345)联合资助。

作者简介: 贾彬(1992-), 男, 工程师, 主要从事基础地质、矿产地质方面研究。E-mail: jiaabin1913@163.com。

* 通讯作者: 吴欢欢(1993-), 男, 高级工程师, 主要从事三稀矿产调查评价与成矿规律研究。E-mail: whhcgub@163.com。

Gold Ore Exploration, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100038, China)

Abstract: An alkaline magmatic belt, consisting of widespread ultrabasic-basic dikes and alkaline volcanic rocks, occurs along the Hongchunba-Zengjiaba fault in the northern Daba shan aera of South Qinling. Zircon U-Pb dating of trachytic volcanic rocks in the Ziyang-Zhenping area shows that the trachytic rocks erupted in early Silurian (442 Ma~439 Ma), coeval to the basic dikes in the area. Whole-rock compositions of the trachytic rocks and adjacent diabase show that the trachytic rocks have relatively high SiO_2 (59.1%~65.4%) and alkali content ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$, 8.40%~11.4%), but low CaO (0.35%~1.89%), MgO (0.64%~3.31%), and TiO_2 (0.74%~1.67%) contents. The trachytic rocks show significant enrichment of large ion lithophile and light rare earth elements, indicating that they underwent a high-degree evolution. The trachytic rocks have high Nb/U ratios (=39.9~112, average 58.77) and Nb/Ta ratios (=15.7~43.9, average 19.9) close to the values of the primitive mantle, revealing that both the trachytic rocks and the basic dikes are derived from mantle. The average Nb/Th, Th/Yb, Nb/Ta, Th/U ratios of the trachytic volcanic rocks (10.5, 3.9, 20.0, and 5.7, respectively) are similar to those of the diabase (11.7, 1.6, 19.6, and 5.8, respectively), suggesting that they evolved from cogenetic magma with different degrees of fractional crystallization. Combined with the regional chronological data, geochemical and tectonic characteristics, it is proposed that the early Paleozoic trachytic rocks and alkaline basic rocks in the Ziyang-Zhenping area were formed in a rift environment under the continental extensional setting. The trachytic and basic rocks originated and evolved from the initial basaltic magma, which triggered by the partial melting of the upper mantle, and evolved through different degrees of fractional crystallization.

Keywords: alkaline rocks; zircon U-Pb dating; trachytic rocks; early Silurian; rifting

秦岭构造带是中央造山带的重要组成部分,是中国大地构造格局的枢纽(王一烽等, 2021; 孟五一等, 2024; 冉亚洲等, 2024; 张梓尧等, 2024),其西部衔接昆仑(祁连)造山带与阿尔金造山带,东部与大别-苏鲁造山带相接,同时又是华北克拉通与扬子克拉通的过渡地带(图 1a)(张国伟等, 1996, 2001)。南秦岭-北大巴山地区主要发育一套早古生代地层,在该套地层中出露一条呈 NWW-SEE 向展布的超基性、基性岩墙(脉)和碱性火山岩组成的碱性岩浆岩带,为探索秦岭造山带早古生代构造演化历史、地幔源区性质、岩浆演化过程及构造背景提供了理想的天然实验室。前人对该套碱性岩浆岩带进行了岩石学、矿物学、地球化学以及年代学等方面研究,认为北大巴山超基性、基性岩和碱性火山岩构成“双峰式”碱性玄武岩演化序列,形成于早古生代,进而认为该套碱性岩浆岩是扬子板块北缘被动大陆边缘伸展作用的产物(黄月华等, 1990; 夏林圻等, 1994; 张成立等, 2002, 2007, 邹先武等, 2011)。然而,近年来有些学者认为,这套基性岩墙和碱性火山杂岩形成时代于中晚志留世以后,为弧后拉伸环境产物(王宗起等, 2009; 王刚等, 2014; Wang et al., 2015; 张英利等, 2016)。部分学者认为,该套碱性岩与早古生代地幔柱活动有关(张成立等,

2007; Zhang et al., 2017; 许光等, 2018)。也有一些学者认为,粗面岩与超基性、基性岩墙和碱性玄武岩杂岩并非同一期岩浆活动的产物,粗面岩可能形成于中生代,这套基性岩和火山杂岩则是大洋板内环境下的产物(向忠金等, 2010a, 2010b, 2016)。

缺少区域上碱性火山岩的同位素年龄限定可能是造成上述争议的原因之一。有较多研究者对这套碱性岩浆岩带的形成时代进行过研究,利用锆石 U-Pb 定年获得多个岩墙(脉)(以辉绿岩、辉长岩为主)的准确年龄,但未有系统对比研究;而对碱性火山岩的时代则主要根据火山岩全岩或单矿物的 Rb-Sr 等时线或 K-Ar 年龄以及围岩地层中古生物化石时代进行限定(夏林圻等, 1994; 雒昆利等, 2001)。近年来,也有一些 U-Pb 同位素定年的报道,但都集中在北大巴山东部竹溪-竹山一带,准确地限定区域碱性岩浆活动时间及规律还需区域性的年代学和岩石地球化学研究。

近年来,在参与紫阳-镇坪地区的区域矿产地质调查中,笔者新发现了大量粗面岩及辉绿岩脉出露,为以上问题提供了新的研究载体。在前人研究的基础上,笔者通过对紫阳-镇坪地区的粗面岩、粗面质火山碎屑岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和全岩地球化学分析,对比区内同期侵位的辉绿岩脉的主微量成

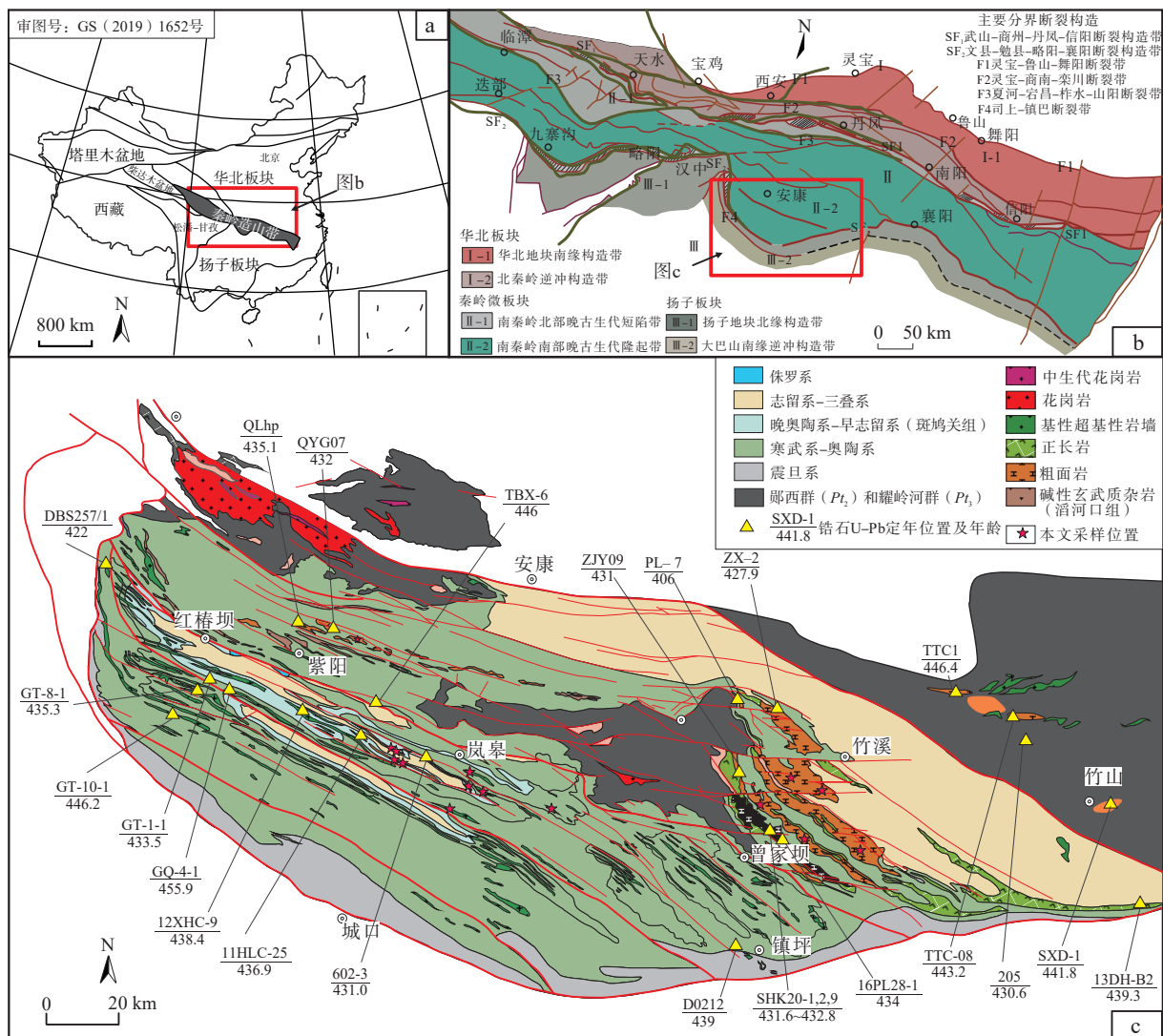


图1 中国构造纲要图(a)(据 Mattauer et al., 1985)、秦岭构造带简图(b)(据赵东宏等, 2019 修)和
北大巴山区域地质图(c)(据 Wang et al., 2017a 修)(年代学数据来源同表 3)

Fig. 1 (a) Tectonic sketch map of China, (b) simplified tectonic map showing the tectonic framework of the Qinling Orogen, and
(c) regional geological map of the northern Daba shan area

分特点, 结合区域上已发表的基性岩及碱性火山岩数据, 探讨粗面质火山岩的形成时代、岩石成因和物源特征以及与区域上基性岩墙的成因联系, 这也将有助于更好地认识南秦岭北大巴山早古生代地球动力学过程和构造演化。

1 区域地质概况

秦岭造山带以商丹缝合带为界, 将秦岭划分为北秦岭造山带和南秦岭造山带。北大巴山是南秦岭造山带的重要组成部分, 位于南秦岭南缘, 东邻武当隆起, 北接安康断裂, 南接城口断裂(Wang et al., 2017a)。

研究区位于扬子地块与南秦岭-北大巴山造山带结合部位(图 1b), 区内区域性大断裂有红椿坝-曾家坝断裂和高桥断裂, 断裂总体走向为 NWW 向, 倾向 NNE。其中, 红椿坝-曾家坝断裂可将北大巴山进一步划分为南、北地区, 其构造变形、地层分布、岩浆岩等均有所不同, 构造变形呈现出由北向南减弱的趋势, 构造样式由北部的韧性组构和密集的褶皱转变为南部与断层相关的中型褶皱。从地层分布来看, 北部主要出露郧西群、武当山群、耀岭河群等上元古界基底和寒武纪、奥陶纪沉积盖层。南部主要出露新元古代灯影组、陡山沱组以及寒武纪和志留纪地层; 区内岩浆岩活动十分强烈, 紫阳-镇坪地区以红椿坝断裂为中心

的裂隙槽内分布大量的早古生代超基性、基性岩墙和碱性火山岩,向东与湖北竹溪地区发育的镁铁质岩脉和火山岩相连,构成南秦岭特有的早古生代镁铁质岩浆岩带(图 1c)(张成立等, 2007)。

区内超基性、基性岩墙广泛出露,大部分岩墙侵入寒武纪—志留纪地层,形成 NW-SE 向宽数米至数百米、长数百至数千米的岩墙(脉),岩性主要为辉绿岩、辉长岩、煌斑岩和正长岩。碱性火山岩主要出露在紫阳—岚皋一带和竹溪—曾家坝一带,主要包括粗面岩、正长岩、火山碎屑岩,火山岩也呈 NW-SE 向展布,他们相互互层,与周围的志留纪地层呈整合接触,并与同时代的超基性岩、基性岩局部侵入接触,其长轴方向与基性岩墙沿走向大致平行(图 1c)。

2 样品特征及分析方法

2.1 样品特征

本次研究采取区内紫阳—镇坪地区共 11 件粗面质火山岩及 4 件辉绿岩样品,进行全岩主微量分析,选取 4 件典型火山岩(2 件粗面岩,2 件粗面质凝灰岩)样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,样品新鲜,无风化(采样位置见图 1c)。

粗面岩新鲜面为灰绿色,块状构造,具斑状结构。岩石由斑晶(15%)及基质(85%)组成。斑晶成分主要为钾长石,其次有少量黑云母。钾长石呈半自形晶,粒径为 0.5~2.6 mm,主要为透长石,少量为正长石;黑云

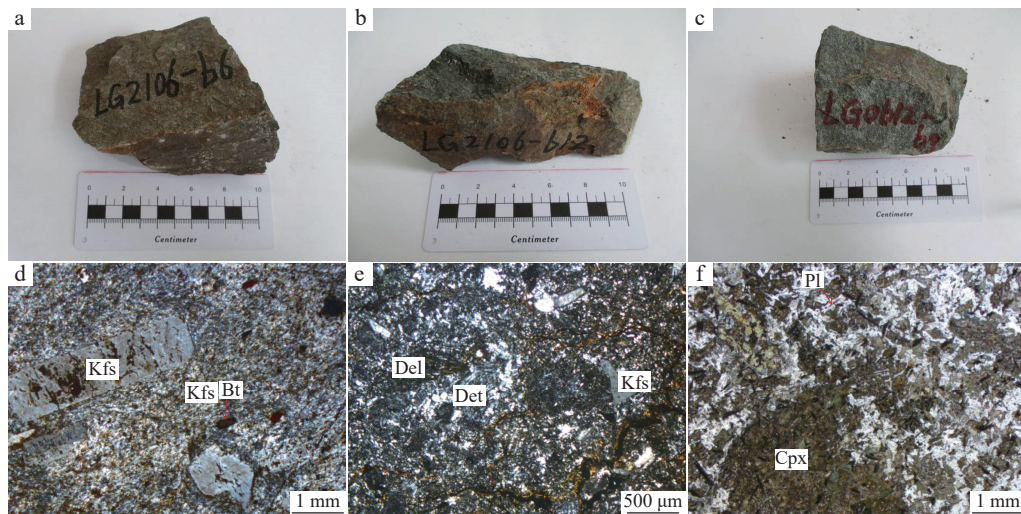
母呈片状,填隙状分布,粒径约为 0.05~0.50 mm。基质主要为钾长石微晶、少量斜长石微晶组成,多呈针状、板状,可见弱定向排列,黑云母呈鳞片状(图 2a、图 2d)。

粗面质岩屑晶屑凝灰岩新鲜面为青灰色,凝灰结构,块状构造。主要由岩屑、长石晶屑组成,岩屑粒径约为 0.20~0.90 mm,呈棱角状,多为粗面质岩屑、安山质岩屑及少量凝灰质岩屑。晶屑粒径约 0.10~0.70 mm,呈半自形板状、棱角状,常具熔蚀边或阶梯状断口,主要为透长石、钾长石,及少量斜长石、石英,杂乱分布。基质由火山尘、铁质等组成,钠长石化、绢云母化发育(图 2b、图 2e)。

辉绿岩新鲜面为灰绿色,块状构造,具辉绿结构。主要由斜长石(50%),单斜辉石(45%),金属矿物(5%)组成。斜长石粒径约为 0.20~1.40 mm,呈半自形板状,绿帘石化强烈,局部见聚片双晶、卡钠复合双晶。单斜辉石粒径约为 0.30~2.40 mm,呈半自形柱状,常具简单双晶,局部绿泥石化(图 2c、图 2f)。

2.2 分析方法

锆石单矿物挑选由西安瑞石地质科技有限公司完成。样品常规粉碎淘洗后,经磁选和重液分离,并在双目镜下进行人工挑选。锆石制靶和阴极发光(CL)图像采集在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石 U-Pb 同位素测年于中国地质调查局西安地质调查中心测试实验室完成,测试过程中,激光斑束直径为 30 μm ,频率为 10 Hz,采用了 He 作为载体,Ar 作为补偿气,同位素组成用锆石 91500 进行外标校正,



a、d.粗面岩由钾长石斑晶和富碱长石-黑云母微基质组成; b、e.粗面质岩屑晶屑凝灰岩由钾长石晶屑、岩屑碎片和基质组成;
c、f.辉绿岩由辉石、斜长石斑晶组成; Bt.黑云母; Kfs.钾长石; Del.岩屑; Cpx.单斜辉石; Pl.斜长石

图2 紫阳-镇坪地区粗面质火山岩及辉绿岩的手标本和显微照片

Fig. 2 Hand specimen photos and photomicrographs of the trachytic rocks from the Ziyang-Zhenping area

采用 ICPMSDataCal 软件对数据进行后期处理, 年龄的计算和谐和图的绘制采用 Isoplot3.0 软件完成。

15 件主微量样品测试在中国地质调查局西安矿产资源调查中心实验室完成。主量、微量元素分析首先将岩石样品洗净、烘干, 用小型颚式破碎机破碎至粒度为 5.0 mm 左右, 然后用球磨仪研磨至粉末状 (>200 目) 进行测试。主量元素用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 测试, FeO 应用氢氟酸-硫酸溶样、重铬酸钾滴定的容量法, 分析精度优于 2%。微量元素用 ICP-MS 完成测试, 微量元素分析的精度和准确度优于 5%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

本次研究在紫阳-镇坪地区粗面质火山岩中选

取典型样品挑选锆石进行 U-Pb 年代学研究 (两件凝灰岩样品 LG0613-TW1、LG2106-TW12, 采样坐标分别为 N 32°19'28"、E108°46'09" 和 N 32°19'10"、E 108°49'18", 两件粗面岩 LG2106-TW6、LG2106-TW7, 采样坐标分别为 N 32°18'15"、E108°50'15" 和 N 32°18'29"、E 108°48'15"), 所测样品中锆石多为无色透明-浅褐色, 自形-半自形短柱状, 长为 70~120 μm , 长宽比为 1.5:1~2:1, 内部发育岩浆锆石典型的振荡环带 (图 3)。样品中 U、Th 含量分别为 109×10^{-6} ~ 2806×10^{-6} 和 67.99×10^{-6} ~ 3169×10^{-6} , Th/U 值为 0.27~4.87, 与岩浆锆石的比值相当 (>0.2) (Rubatto, 2002)。LA-ICP-MS 分析结果见表 1, U-Pb 谐和图及加权平均年龄图见图 4。

4 件样品的锆石测试数据在 U-Pb 谐和图中均位于谐和线上及其附近 (图 4)。其中 LG0613-TW1 中的

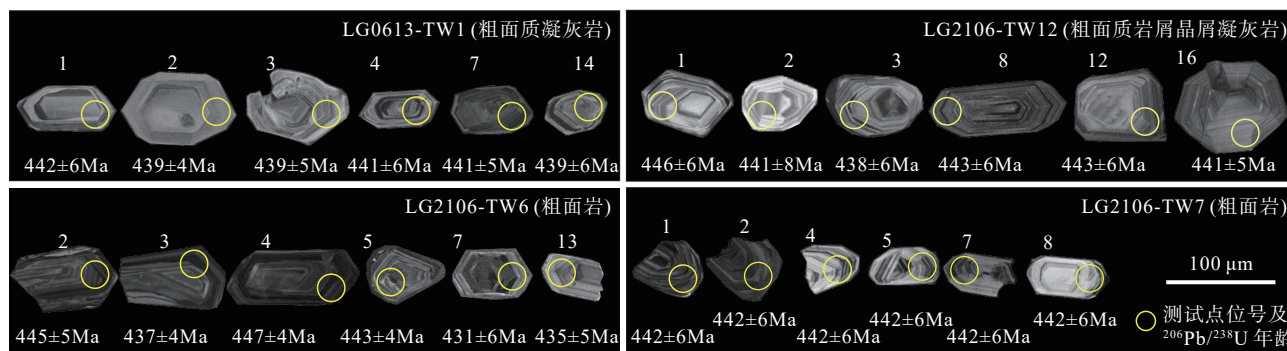


图3 粗面质火山岩典型锆石阴极发光图像

Fig. 3 Representative zircon cathodoluminescence (CL) images and U-Pb ages of the trachytic volcanic rocks

表 1 紫阳-镇坪地区粗面岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析结果

Tab. 1 U-Th-Pb analysis results of the zircon from the trachyte in Ziyang-Zhenping area

点号	含量(10 ⁻⁶)				同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁶ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁷ Pb/	1σ	²⁰⁶ Pb/	1σ	
				²⁰⁶ Pb		²³⁵ U		²³⁸ U		²⁰⁶ Pb		²³⁵ U		²³⁸ U		
LG0613-TW1	1	83.47	158.14	0.53	0.057 29	0.002 87	0.560 57	0.027 27	0.071 07	0.001 01	502	107	452	18	443	6
	2	186.92	381.65	0.49	0.057 09	0.001 81	0.554 45	0.016 97	0.070 53	0.000 77	495	69	448	11	439	5
	3	259.02	398.33	0.65	0.055 68	0.001 77	0.539 86	0.016 56	0.070 42	0.000 77	439	69	438	11	439	5
	4	866.77	778.22	1.11	0.056 25	0.002 56	0.547 97	0.024 21	0.070 75	0.000 94	462	99	444	16	441	6
	5	308.86	167.44	1.84	0.058 57	0.002 6	0.571 01	0.024 53	0.070 8	0.000 93	551	94	459	16	441	6
	6	167.49	269.46	0.62	0.054 46	0.003 41	0.531 82	0.032 45	0.070 93	0.001 17	390	135	433	22	442	7
	7	186.59	266.84	0.70	0.056 76	0.002 18	0.552 72	0.020 54	0.070 72	0.000 85	482	83	447	13	441	5
	8	206.90	291.58	0.71	0.061 65	0.002 19	0.602 65	0.020 65	0.070 99	0.000 84	662	74	479	13	442	5
	9	246.06	308.64	0.80	0.056 44	0.001 99	0.549 74	0.018 73	0.070 73	0.000 82	469	77	445	12	441	5
	10	453.68	368.10	1.23	0.055 5	0.001 79	0.542 17	0.016 83	0.070 94	0.000 78	432	70	440	11	442	5
	11	267.47	130.72	2.05	0.058 89	0.003 44	0.566 87	0.032 18	0.069 9	0.001 1	563	122	456	21	436	7
	12	166.50	380.17	0.44	0.055 79	0.001 75	0.550 12	0.016 66	0.071 6	0.000 78	444	68	445	11	446	5
	13	277.25	108.52	2.55	0.057 13	0.003 34	0.556 39	0.031 68	0.070 72	0.001 1	496	124	449	21	441	7
	14	283.43	404.08	0.70	0.058 52	0.002 72	0.568 47	0.025 65	0.070 53	0.000 96	550	98	457	17	439	6
	15	561.81	1112.37	0.51	0.068 12	0.002 31	0.664 79	0.021 69	0.070 86	0.000 84	872	69	518	13	441	5

续表 1

点号	含量 (10 ⁻⁶)			同位素比值						年龄 (Ma)						
	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
LG2106-TW12	1	248.24	247.81	1.00	0.057 13	0.002 39	0.564 75	0.022 96	0.071 69	0.000 92	496	90	455	15	446	6
	2	245.27	303.93	0.81	0.056 47	0.004 62	0.550 82	0.043 96	0.070 74	0.001 46	470	172	446	29	441	9
	3	538.48	411.66	1.31	0.068 02	0.003 35	0.659 08	0.031 45	0.070 27	0.001 06	869	99	514	19	438	6
	4	673.89	346.88	1.94	0.054 82	0.002 06	0.531 54	0.019 42	0.070 33	0.000 85	405	81	433	13	438	5
	5	502.57	417.46	1.20	0.056 56	0.001 91	0.550 97	0.018 01	0.070 64	0.000 82	474	74	446	12	440	5
	6	2 167.42	444.78	4.87	0.064 01	0.002 03	0.627 42	0.019 17	0.071 08	0.000 82	742	66	495	12	443	5
	7	67.99	151.51	0.45	0.055 7	0.003 64	0.539 86	0.034 46	0.070 27	0.001 21	440	140	438	23	438	7
	8	124.86	248.42	0.50	0.057 16	0.002 49	0.560 44	0.023 74	0.071 09	0.000 94	497	94	452	15	443	6
	9	577.27	785.76	0.73	0.052 61	0.002 02	0.509 97	0.019 01	0.070 29	0.000 86	312	85	418	13	438	5
	10	734.09	380.45	1.93	0.056 37	0.002 02	0.546 46	0.019 05	0.070 29	0.000 84	466	78	443	13	438	5
	11	89.61	332.60	0.27	0.054 91	0.003 66	0.536 94	0.034 94	0.070 9	0.001 24	408	143	436	23	442	7
	12	72.23	189.14	0.38	0.055 53	0.002 93	0.544 47	0.028 05	0.071 09	0.001 05	433	114	441	18	443	6
	13	248.67	358.03	0.69	0.055 43	0.002 05	0.537 17	0.019 26	0.070 26	0.000 85	429	80	437	13	438	5
	14	531.38	433.10	1.23	0.056 15	0.002 54	0.547 77	0.024 11	0.070 72	0.000 96	458	98	444	16	441	6
	15	2 382.34	538.66	4.42	0.057 06	0.001 73	0.557 12	0.016 35	0.070 77	0.000 79	493	66	450	11	441	5
	16	129.01	444.77	0.29	0.072 98	0.002 32	0.713 17	0.021 86	0.070 83	0.000 85	1 013	63	547	13	441	5
LG2106-TW06	1	155.12	231.21	0.67	0.063 99	0.002 95	0.631 95	0.028 25	0.071 7	0.001	446	6	558	13	446	6
	2	196.15	424.66	0.46	0.057 96	0.002 29	0.570 13	0.021 85	0.071 42	0.000 89	445	5	517	12	445	5
	3	457.55	1 141.39	0.40	0.057 49	0.001 41	0.555 03	0.013	0.070 09	0.000 7	437	4	473	8	437	4
	4	816.43	1 709.75	0.48	0.058 38	0.001 14	0.577 78	0.010 66	0.071 85	0.000 68	447	4	456	6	447	4
	5	444.08	1 160.21	0.38	0.058 94	0.001 38	0.577 21	0.012 92	0.071 1	0.000 71	443	4	510	8	443	4
	6	967.87	2 228.36	0.43	0.059 45	0.001 12	0.583 75	0.010 35	0.071 28	0.000 67	444	4	461	6	444	4
	7	3 169.14	2 805.98	1.13	0.062 84	0.002 65	0.599 16	0.024 47	0.069 22	0.000 91	431	6	325	9	431	6
	8	1 401.89	2 206.96	0.64	0.057 04	0.002 75	0.548 81	0.025 66	0.069 85	0.000 98	435	6	470	11	435	6
	9	403.18	987.20	0.41	0.057 5	0.001 38	0.566 08	0.012 95	0.071 46	0.000 72	445	4	488	8	445	4
	10	567.20	724.58	0.78	0.055 73	0.001 61	0.555 49	0.015 43	0.072 35	0.000 77	450	5	431	6	450	5
	11	346.38	768.23	0.45	0.062 77	0.001 78	0.606 29	0.016 53	0.070 11	0.000 76	437	5	436	8	437	5
	12	406.82	1 208.83	0.34	0.056 93	0.001 35	0.550 03	0.012 49	0.070 12	0.000 7	437	4	472	8	437	4
	13	607.55	527.18	1.15	0.056 69	0.002 21	0.545 83	0.020 64	0.069 88	0.000 86	435	5	438	7	435	5
	14	516.25	1 490.73	0.35	0.058 56	0.001 42	0.569 36	0.013 21	0.070 56	0.000 71	440	4	470	8	440	4
	15	192.96	233.53	0.83	0.055 27	0.003 55	0.533 44	0.033 39	0.070 05	0.001 17	436	7	441	14	436	7
LG2106-TW07	1	354.87	992.38	0.36	0.066 96	0.004 48	0.654 96	0.042 52	0.070 98	0.001 33	837	134	512	26	442	8
	2	510.28	1 179.68	0.43	0.069 46	0.002 25	0.676 53	0.021 05	0.070 68	0.000 83	912	65	525	13	440	5
	3	385.50	926.43	0.42	0.055 06	0.002 51	0.526 64	0.023 29	0.069 4	0.000 93	415	98	430	15	433	6
	4	199.70	292.77	0.68	0.057 63	0.002 61	0.562 09	0.024 76	0.070 76	0.000 95	515	97	453	16	441	6
	5	101.70	195.49	0.52	0.130 58	0.006 17	1.287 71	0.057 56	0.071 54	0.001 29	2 106	81	840	26	445	8
	6	242.41	393.30	0.62	0.213 87	0.005 97	2.090 21	0.053 4	0.070 9	0.000 99	2 935	44	1 146	18	442	6
	7	220.95	260.02	0.85	0.072 97	0.004 72	0.702 79	0.044 01	0.069 87	0.001 31	1 013	126	541	26	435	8
	8	235.22	366.80	0.64	0.066 19	0.007 93	0.642 19	0.074 91	0.070 38	0.002 16	812	232	504	46	439	13
	9	235.35	193.31	1.22	0.054 4	0.004 58	0.528 96	0.043 56	0.070 54	0.001 46	388	179	431	29	439	9
	10	145.16	366.94	0.40	0.056 54	0.002 77	0.548 04	0.026 09	0.070 31	0.000 99	473	105	444	17	438	6
	11	300.74	222.24	1.35	0.055 94	0.003 39	0.543 16	0.032 09	0.070 42	0.001 14	450	130	441	21	439	7

15 个锆石测试点位 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 436~443 Ma, 获得加权平均年龄为 (442.2±1.31)Ma (MSWD=0.35) (图 4a)。样品 LG2106-TW12 中的 16 个锆石测试点位 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 438~446 Ma, 加权平均年龄为 (441.9±1.34)Ma (MSWD=0.72) (图 4b)。样品 LG2106-TW7 中的 11 个锆石测试点位 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 433~445 Ma, 加权平均年龄为 (439.2±2.01)Ma (MSWD=

0.28) (图 4c)。样品 LG2106-TW6 中的 15 个锆石测试点位 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 435~447 Ma, 加权平均年龄为 (441.1±1.33)Ma (MSWD=0.72) (图 4d)。结果显示 4 个样品年龄误差范围内一致, 为早志留世喷发。

3.2 地球化学特征

11 件紫阳-镇坪地区粗面质火山岩和 4 件辉绿岩样品主微量元素测试结果见表 2。

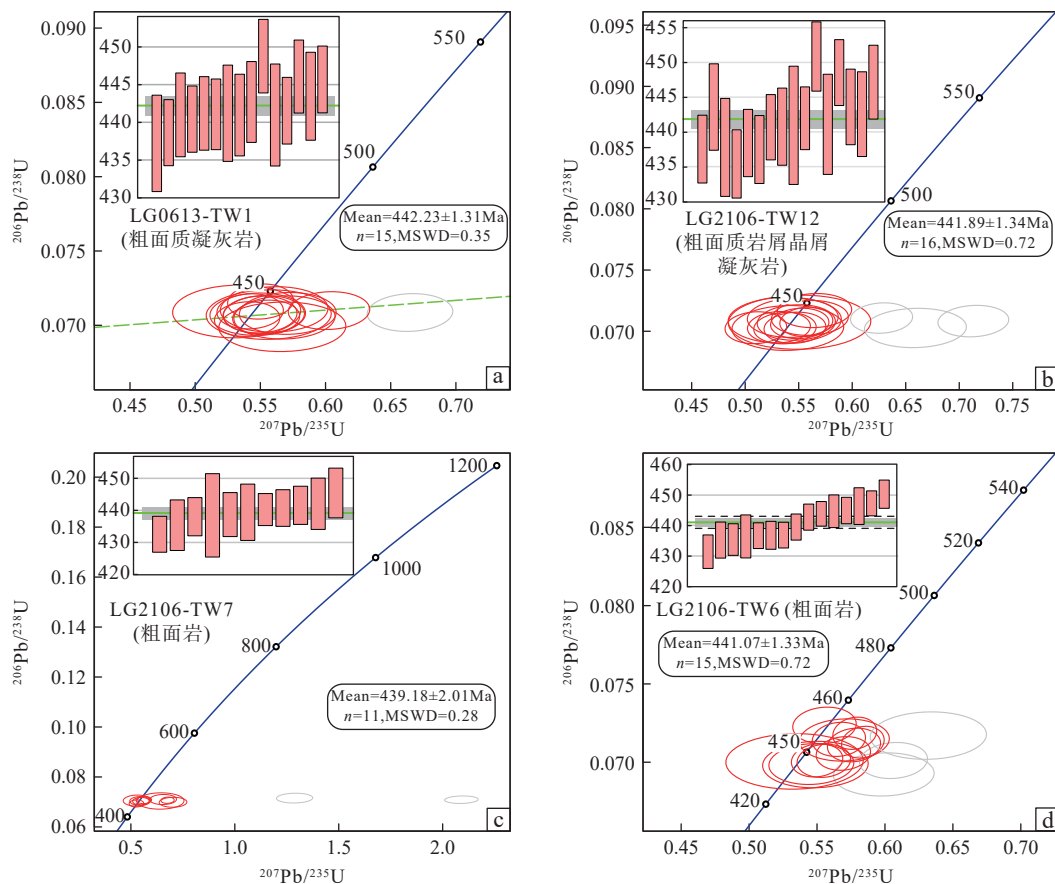


图4 粗面质火山岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄和加权平均年龄(灰色圆圈代表 Pb 丢失数据)

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams and weighted average diagrams of the trachytic volcanic rocks

3.2.1 粗面岩

主量元素特征显示,所有粗面质火山岩有较高 SiO_2 含量(59.11%~65.43%,平均为 61.92%)、高 Al_2O_3 含量(15.05%~18.58%,平均为 16.25%)以及较高的全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 8.40%~11.40%,平均值为 9.90%),同时具有较低的 CaO 含量(0.35%~1.89%,平均值为 1.00%)、 MgO 含量(0.64%~3.31%,平均值为 2.15%)、 TiO_2 (0.74%~1.67%,平均值为 1.09%)和 P_2O_5 含量(0.12%~0.24%,平均值为 0.19%),指示其经历了较高程度的演化。所有样品总体富钠, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值范围为 0.92~1.21,平均为 0.96,不符合 Morrison(1980)定义的钾玄岩系列的条件。里特曼指数位于 3.78~6.62 之间,属碱性火山岩系列;在火山岩 TAS 分类图解中,11 个样品均落在粗面岩区(图 5a)。图中(图 5b) SiO_2 -AR(碱度率)图解中所有样品落入碱性区域。可见,本次研究中的粗面质火山岩主要为钾质碱性系列。

在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图和原始地幔标准化蛛网图中,所有粗面质火山岩样品均显示出相似的分布型式(图 6)。在球粒陨石标准化稀土元

素配分模式图上(图 6a),粗面岩样品 REE 分布模式为右倾陡坡型,稀土元素变化范围较大($\sum\text{REE}=216 \times 10^{-6} \sim 1147 \times 10^{-6}$),轻稀土含量高($\sum\text{LREE}=194 \times 10^{-6} \sim 1071 \times 10^{-6}$),重稀土含量较低($\sum\text{HREE}=21.4 \times 10^{-6} \sim 76.1 \times 10^{-6}$) $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}=9.07 \sim 23.8$, $(\text{La}/\text{Yb})_N=10.0 \sim 48.5$,显示轻稀土强烈富集; $\delta\text{Eu}=0.53 \sim 0.94$,平均为 0.74,多数样品显示弱负 Eu 异常; $\delta\text{Ce}=0.72 \sim 1.44$,平均为 1.08,表现出弱正 Ce 异常;在微量元素蛛网图上(图 6b),样品元素分布特征基本一致,均显示大离子亲石元素(LILE)(Rb、Th、U 等)和高场强元素(HFSE)(Nb、Ta、Zr、Hf)相对富集,而 Sr、Ti、P 元素强烈亏损。

3.2.2 基性岩

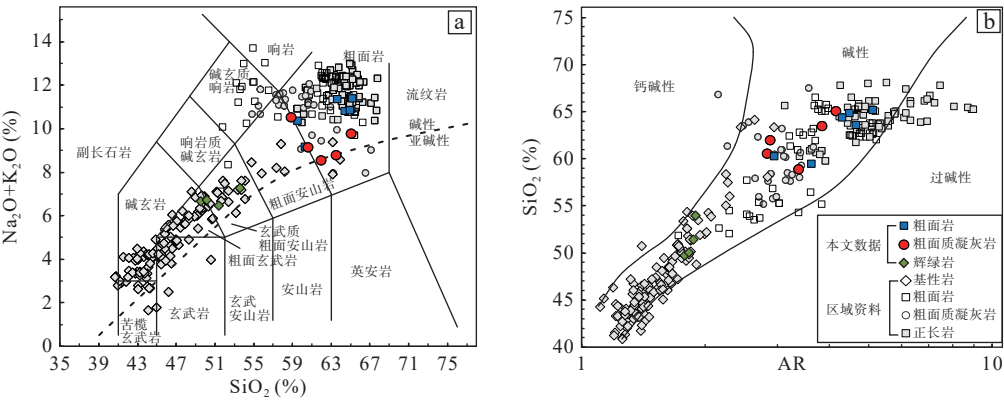
分析结果显示,辉绿岩样品具有较低的 SiO_2 含量(48.00%~53.00%,平均为 50.18%),属于基性岩类。较高的 TiO_2 含量(2.05%~2.60%,平均为 2.37%)、 Al_2O_3 含量(14.40%~15.30%,平均为 15.00%)以及碱质含量($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量 6.32%~6.93%,平均值为 5.17%),所有样品均富钠, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.33~0.54,

表 2 粗面质火山岩及辉绿岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果表Tab. 2 Major (%) and trace(10^{-6}) elements analysis of the trachyte volcanic rocks and diabase

样品号	LG2106-6	LG2106-7	LG20-5	LG20-8	LG20-9	LG20-10	LG0613-1	LG0613-2	LG0613-3	LG2106-12	LG20-4	PM04/57-2	PM04/61-2	PM04/61-3	PM04/61-4
岩性	粗面岩						粗面质岩屑晶屑凝灰岩						辉绿岩		
SiO ₂	64.43	65.43	59.18	59.40	62.94	63.12	61.30	64.20	62.60	59.11	59.37	50.00	53.00	48.50	49.24
TiO ₂	1.16	1.07	0.74	0.75	0.97	0.97	1.45	1.11	1.67	1.40	0.75	2.60	2.05	2.42	2.39
Al ₂ O ₃	16.13	16.39	16.77	16.72	16.27	15.05	16.30	15.30	14.20	18.58	17.02	14.40	15.24	15.10	15.34
Fe ₂ O ₃	4.82	4.47	7.60	7.76	4.53	4.50	7.68	5.97	8.25	7.58	7.10	12.60	8.84	11.10	11.20
MnO	0.25	0.22	0.07	0.07	0.17	0.15	0.06	0.06	0.21	0.15	0.07	0.25	0.17	0.18	0.19
MgO	0.77	0.64	3.28	3.31	1.56	1.57	2.49	1.89	2.45	2.53	3.15	3.79	3.23	4.00	3.95
CaO	0.75	0.55	1.44	1.45	1.08	1.89	1.02	0.35	0.43	0.44	1.59	5.82	7.24	7.41	6.96
Na ₂ O	5.57	5.31	4.30	5.20	5.63	5.49	5.14	5.71	3.89	5.33	4.30	3.99	5.20	4.21	4.35
K ₂ O	5.15	6.09	4.67	5.10	5.58	5.06	3.26	3.88	4.72	5.00	4.58	2.17	1.73	2.11	2.11
P ₂ O ₅	0.24	0.21	0.12	0.12	0.23	0.24	0.19	0.20	0.17	0.26	0.12	1.26	0.95	1.30	1.38
Na ₂ O+K ₂ O	10.73	11.40	8.97	10.30	11.21	10.55	8.40	9.59	8.61	10.33	8.88	6.16	6.93	6.32	6.46
A/NK	1.50	1.44	1.87	1.62	1.45	1.43	1.94	1.60	1.65	1.80	1.92	2.34	2.19	2.39	2.37
A/CNK	1.00	1.00	1.14	1.00	0.94	0.84	1.18	1.07	1.15	1.24	1.14	0.74	0.64	0.66	0.69
k ₂ O/Na ₂ O	0.92	1.15	1.09	0.98	0.99	0.92	0.63	0.68	1.21	0.94	1.07	0.54	0.33	0.50	0.49
烧失量*	0.51	0.27	1.12	0.42	0.82	1.98	0.86	0.72	0.85	0.24	1.88	2.45	1.77	2.67	2.19
总量	99.81	100.67	99.34	100.29	99.78	100.02	99.75	99.39	99.44	100.61	99.94	99.33	99.45	99.00	99.33
AR	4.49	5.11	2.94	3.62	4.65	4.30	2.88	4.17	3.86	3.38	2.83	1.88	1.89	1.78	1.82
里特曼指数	5.37	5.80	4.97	6.47	6.30	5.53	3.86	4.34	3.78	6.62	4.82	5.42	4.80	7.26	6.73
lgσ	0.73	0.76	0.70	0.81	0.80	0.74	0.59	0.64	0.58	0.82	0.68	0.73	0.68	0.86	0.83
lgr	0.96	1.02	1.23	1.19	1.04	0.99	0.89	0.94	0.79	0.98	1.23	0.60	0.69	0.65	0.66
Y	43.0	44.3	42.3	38.3	27.5	34.0	36.0	23.7	34.8	27.9	62.7	47.0	39.0	46.4	45.4
La	100	110	290	290	82.0	95.0	61.7	43.2	90.2	201	205	67.30	92.0	98.9	99.3
Ce	214	232	493	493	125	150	130	94.0	194	276	394	155	199	224	215
Pr	24.1	26.0	53.3	24.1	22.0	25.0	14.1	10.4	18.4	24.7	41.0	17.8	22.6	26.3	24.9
Nd	90.9	97.3	199	199	54.0	64.0	53.3	37.8	66.5	73.8	165	78.0	98.5	116	110
Sm	15.4	16.3	30.3	50.1	14.5	18.0	10.1	7.3	12.0	9.26	22.5	16.2	18.1	21.8	20.9
Eu	3.72	3.91	5.04	5.93	3.10	3.40	2.92	1.81	3.13	2.99	3.53	5.12	7.43	8.91	8.12
Gd	14.4	15.0	25.5	25.5	10.5	13.5	9.48	6.49	10.6	10.3	18.4	15.3	15.9	19.5	18.5
Tb	1.83	1.90	3.86	3.86	1.45	1.90	1.39	0.95	1.57	1.07	2.73	2.19	2.03	2.48	2.33
Dy	9.73	9.90	20.6	39.1	7.60	9.30	8.11	5.55	8.97	5.39	14.7	11.8	10.40	12.6	11.70
Ho	1.74	1.77	3.84	3.84	1.40	1.80	1.54	1.08	1.72	1.01	2.76	2.18	1.83	2.20	2.06
Er	4.93	5.02	10.59	10.59	3.60	4.80	4.33	3.25	5.00	3.12	7.67	5.91	4.75	5.63	5.29
Tm	0.63	0.65	1.53	1.53	0.50	0.68	0.63	0.49	0.73	0.43	1.09	0.79	0.60	0.72	0.66
Yb	4.00	4.13	8.72	8.72	2.60	3.30	3.92	3.10	4.53	2.97	6.54	4.54	3.45	4.13	3.83
Lu	0.56	0.57	1.46	1.46	0.68	0.96	0.59	0.47	0.65	0.43	1.04	0.64	0.49	0.61	0.57
Nb	137	134	323	323	144	144	63.5	29.1	139	242	212	71.6	76.5	70.3	71.2
Ta	6.91	7.15	17.9	34.3	7.82	7.83	3.08	1.85	6.86	5.52	12.7	3.57	3.86	3.75	3.60
Zr	666	688	1095	1095	708	698	324	189	557	1013	1031	414	285	278	320
Hf	12.9	13.3	24.5	52.3	15.7	15.7	8.97	6.75	16.0	12.6	22.2	13.5	10.6	10.4	15.2
Li	29.4	24.5	18.1	18.1	37.0	52.3	36.6	21.8	68.6	39.7	41.2	21.60	7.13	10.30	9.31

续表 2

样品号	LG2106-6	LG2106-7	LG20-5	LG20-8	LG20-9	LG20-10	LG0613-1	LG0613-2	LG0613-3	LG2106-12	LG20-4	PM04/57-2	PM04/61-2	PM04/61-3	PM04/61-4
V	31.1	18.0	11.0	11.0	17.1	18.1	17.3	19.4	18.6	18.2	23.8	162	137	187	212
Cr	5.35	2.53	7.13	7.13	5.73	6.31	2.12	2.04	1.58	24.5	8.13	34.8	18.5	11.6	5.87
Co	2.27	1.05	1.15	1.15	0.58	0.42	0.17	0.16	0.15	4.38	3.56	18.8	12.5	13.0	14.0
Ni	1.04	0.64	1.75	1.75	2.13	3.37	0.81	0.84	0.61	17.5	10.8	9.90	5.94	4.15	1.66
Ga	33.0	33.6	46.3	46.3	34.0	35.7	29.2	19.0	22.0	32.3	68.7	25.2	22.6	20.8	22.0
Rb	80.2	90.2	180	274	78.0	74.6	66.4	181	81.5	49.0	169	48.9	34.2	40.3	43.0
Sr	106	92.5	92.5	148	116	46.5	120	47.6	127	148	106	711	2 811	2 121	2 604
Cs	7.67	7.38	11.4	11.4	—	—	2.45	6.51	2.95	1.55	1.26	0.88	0.57	0.61	0.69
W	7.95	8.32	8.48	8.48	—	—	1.17	1.37	1.08	1.92	13.9	0.85	0.71	0.63	0.64
Th	10.5	11.3	25.0	41.5	10.2	9.72	17.6	14.6	13.8	24.5	13.7	7.46	6.38	5.34	5.89
U	2.16	2.08	5.08	8.28	2.44	2.19	3.97	2.26	1.24	4.95	2.08	1.19	1.20	0.94	1.00
ΣREE	486	524	1 146	1 117	328	391	302	216	418	612	887	383	477	544	523
LREE	448	485	1 070	1 041	3 006	355	272	194	384	588	831	339	437	495	478
HREE	37.8	38.9	76.1	76.1	28.3	36.2	30.0	21.4	33.8	24.7	55.0	43.4	39.5	47.9	44.9
LREE/HREE	11.9	12.5	14.1	13.7	10.6	9.81	9.07	9.10	11.4	23.8	15.1	7.83	11.1	10.4	10.6
(La/Yb) _N	17.9	19.1	23.9	23.9	22.6	20.7	11.3	10.0	14.3	48.5	22.5	10.6	19.1	17.2	18.6
δEu	0.76	0.76	0.55	0.55	0.77	0.67	0.91	0.81	0.85	0.94	0.53	0.99	1.34	1.32	1.26
δCe	1.07	1.06	0.97	1.44	0.72	0.75	1.08	1.09	1.17	0.96	1.06	1.10	1.07	1.08	1.06



a.研究区碱性岩及中性岩 TAS 图解(底图据 Middlemost, 1994); b.研究区碱性岩及中性岩 AR- SiO₂(碱度比, [Al₂O₃+CaO+(Na₂O+K₂O)]/[Al₂O₃+CaO-(Na₂O+K₂O)])图解(底图据 Wright, 1969, 背景数据来源同表 3)

图5 紫阳-镇坪地区火山岩样品分类图

Fig. 5 Diagram of tvoltaic rocks from the Ziyang-Zhenping area

平均为 0.37。总体上,样品具有富碱、高 Ti、贫 Si 的特征。在(K₂O+Na₂O)-SiO₂系列划分图解以及 AR 图解中,所有样品均落在碱性系列范围内(图 5)。

在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图显示(图 6c),辉绿岩样品 REE 分布模式为右倾型。样品稀土元素总量较高(ΣREE=383×10⁻⁶~544×10⁻⁶),ΣLREE/ΣHREE 值为 7.83~11.09,(La/Yb)_N 值为 10.63~19.13,平均为 16.38,表明轻重稀土元素分异较为明显,轻稀土富集。前人研究发现,岩石中的橄榄石、斜长

石和磁铁矿的结晶分异作用会导致 REE 的总量升高,但不会造成各元素间明显的分异(Rollinson, 1993)。本次所有辉绿岩样品的配分曲线相互平行,或大致重合,也表明该地区较高的稀土元素总量可能由于岩浆结晶分异导致的。该地区样品基本无负 Eu 异常,个别样品有微弱的正 Eu 异常,δEu 值为 0.99~1.34,平均为 1.23,表明其斜长石结晶分异程度较低;所有样品均显示较低 Cr(5.87×10⁻⁶~34.80×10⁻⁶)、Co(12.50×10⁻⁶~18.80×10⁻⁶)、Ni(1.66×10⁻⁶~9.90×10⁻⁶)值。在微

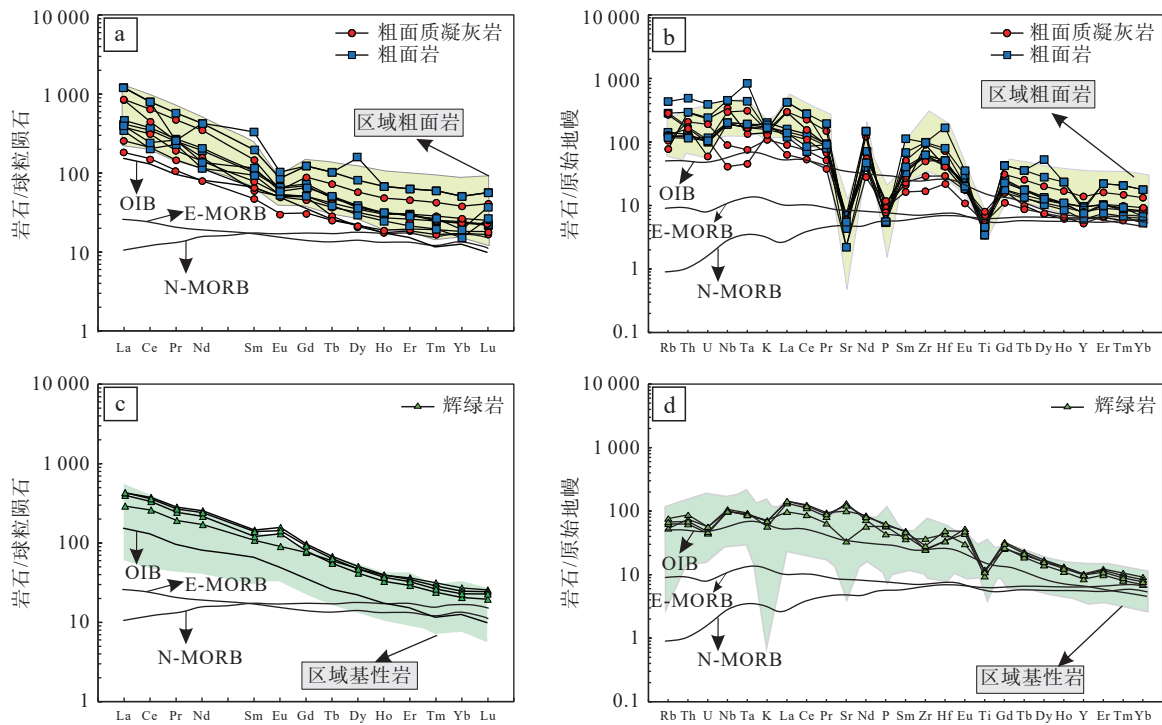


图6 紫阳-镇坪地区粗面岩及基性岩微量元素稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (a、c)和原始地幔标准化蛛网图 (b、d)
(标准化数据据 Sun et al., 1989; 区域背景数据向忠金等, 2016; 杨航等, 2021; Wu et al., 2023)

Fig. 6 (a, c) REE distribution pattern and (b, d) Diagrams of spider for the Trachyte and basic rock in Ziyang-Zhenping area

量元素蛛网图上(图 6d), 所有样品均具有相似的配分曲线, 所有样品显示出 LILE(Rb、Th、U、Sr)和 HFSE(Nb、Ta、Zr、Hf)相对富集, 而 Ti、K 元素相对亏损, 总体上与板内玄武岩微量元素特征一致。

4 讨论

4.1 碱性火山岩形成时代

北大巴山地区沿红椿坝-曾家坝断裂碱性岩浆活动十分发育, 沿 WN-ES 向广泛分布着粗面岩及相关火山碎屑岩。研究区内粗面岩与超基性-基性岩墙群和碱性玄武岩是否同期岩浆活动的产物, 至今仍存在争议。目前对于碱性火山岩的形成时代主要有两种观点:①两套岩石均形成于早古生代, 来源相似。例如, 王刚(2014)、鲁显松等(2019, 2021)利用磷灰石或锆石 U-Pb 定年方法获得紫阳、岚皋地区粗面岩年龄为 443~410 Ma, 与碱性玄武岩为同期岩浆活动产物。②北大巴山粗面岩与超基性、基性岩墙和碱性玄武岩杂岩非同一期岩浆活动产物, 超基性、基性岩墙形成于早古生代, 而粗面岩可能形成于中生代(向忠金等, 2016)。

为了进一步限定碱性火山岩的活动年龄, 笔者收集了近年来不同学者对研究南秦岭北大巴山地区基

性岩墙(脉)和碱性火山岩年代学数据(图 1c)。根据统计的数据, 紫阳-镇坪一带报道的基性岩墙(脉)形成时间为 456~399 Ma, 集中在 443~430 Ma(图 7)。同时辉绿岩、辉长岩脉常以顺层或小角度侵入于寒武纪-奥陶纪地层中, 少量分布于志留纪地层中, 且脉体边缘被印支期面理片理化, 并与围岩发生同步褶皱构造变形。这些同位素年代及其地层和构造变形的关系指示区域内辉长岩、辉绿岩脉侵入时代为加里东

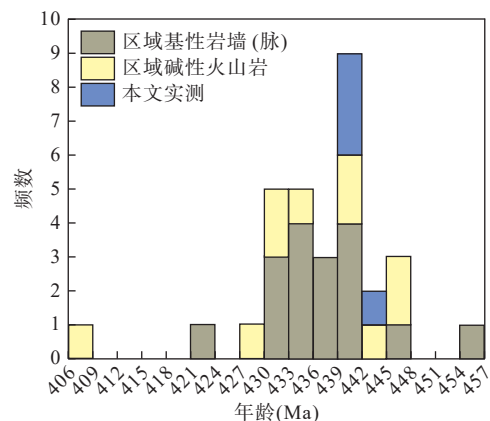


图7 北大巴山地区基性岩墙和碱性火山岩年龄数据频数直方图(引用数据见表3)

Fig. 7 Histogram presenting the frequency of age data of basic dike and alkaline volcanic rocks in the Daba Shan area

表3 北大巴山地区基性岩墙和碱性火山岩年龄数据统计表

Tab. 3 Compiled geochronologic data of basic dikes and alkaline volcanic rocks in the Dabashan

岩石类型	序号	采样位置	岩性	测试矿物	年龄 (Ma)	数据来源
基性岩墙(脉)	1	石泉	辉绿岩	锆石	422.1 ± 4.7	陈虹等, 2014
	2	紫阳	辉绿岩	锆石	446.2 ± 1.1	Zhang et al., 2020
	3	紫阳	辉绿岩	锆石	435.3 ± 1.4	Zhang et al., 2020
	4	紫阳	辉绿岩	锆石	433.5 ± 0.9	张方毅等, 2020
	5	紫阳	辉绿岩	锆石	455.9 ± 1.5	Zhang et al., 2020
	6	紫阳	辉石闪长岩	锆石	438.4 ± 3.1	Wang et al., 2015
	7	紫阳	正长斑岩	锆石	432 ± 5.8	龙井山等, 2016
	8	紫阳	辉绿岩	锆石	440.0 ± 0.5	Wang et al., 2017a
	9	紫阳	辉长岩	锆石	439.9 ± 0.5	Wang et al., 2017a
	10	紫阳	金伯利岩	金云母	431.9	黄月华等, 1992
	11	紫阳	石英正长岩	锆石	435.1 ± 1.2	Wang et al., 2017b
	12	竹山	正长岩	锆石	441.8 ± 2.2	Xu et al., 2008
	13	岚皋	辉绿岩	锆石	436.9 ± 2.4	许光等, 2018
	14	镇坪	辉绿岩	锆石	439 ± 6	邹先武等, 2011
	15	岚皋	辉绿岩	锆石	431.0 ± 3.2	王存智等, 2009
	16	岚皋	辉绿岩	锆石	433.3 ± 4.1	张成立等, 2007
	17	房县	辉绿岩	锆石	439.3 ± 4.1	曹亮等, 2015
碱性火山岩	1	平利	粗面岩	锆石	431–395	Nie et al., 2020
	2	竹溪	粗面岩	锆石	406.0 ± 12.0	Yang et al., 2021
	3	竹溪	粗面岩	锆石	427.9 ± 6.6	Yang et al., 2021
	4	竹溪	粗面岩	磷灰石	434 ± 10	Wang et al., 2021
	5	竹溪	粗面质凝灰岩	锆石	432 ± 2	Wu et al., 2023
	6	竹溪	粗面质凝灰岩	锆石	433 ± 2	Wu et al., 2023
	7	竹溪	粗面质凝灰岩	锆石	432 ± 2	Wu et al., 2023
	8	岚皋	玄武岩	金云母	446 ± 3	向忠金等, 2016
	9	竹山	粗面岩	锆石	446.4 ± 4.4	鲁显松, 2021
	10	竹山	粗面岩	锆石	430.6 ± 2.7	万俊等, 2016
	11	竹山	粗面岩	锆石	441.6 ± 4.0	鲁显松等, 2019
	12	竹山	粗面质凝灰岩	锆石	441.7 ± 3.7	鲁显松等, 2019
	13	竹山	粗面质凝灰岩	锆石	443.2 ± 4.5	鲁显松等, 2019
碱性火山岩	1	岚皋	粗面质凝灰岩	锆石	442.2 ± 1.31	本文
	2	岚皋	粗面质凝灰岩	锆石	441.9 ± 1.34	
	3	岚皋	粗面岩	锆石	439.2 ± 2.01	
	4	岚皋	粗面岩	锆石	441.1 ± 1.33	

期晚期(晚奥陶世—早志留世)。碱性火山岩的年龄数据主要集中在平利—竹山一带, 年龄为 446~406 Ma, 峰值为 443~430 Ma。

笔者分别选取了紫阳—镇坪地区不同位置的粗面岩和粗面质火山碎屑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 得出大致相同的年龄为 (442.2 ± 1.31) Ma ~ (439.2 ± 2.01) Ma, 表明北大巴山粗面质火山岩形成时代为 442.2~439.2 Ma, 进一步支持了研究区大规模碱性岩

浆活动在 443~430 Ma, 与区域内碱质基性岩墙(脉)(443~430 Ma)测年结果基本一致, 两者为大致同期岩浆活动的产物。

4.2 岩浆源区及岩石成因

前人对粗面质火山岩的成因目前主要有以下几种观点: ①富集岩石圈地幔的部分熔融形成粗面质岩浆, 与镁铁质岩石不具演化关系, 是独立的岩浆起源 (Turner et al., 1996; Jahn et al., 2009)。②粗面质岩浆

源自高压环境下增厚下地壳部分熔融(Tchameni et al., 2001; Chen et al., 2010)。③粗面岩岩浆由幔源镁铁质岩浆与壳源花岗质岩浆混合产生(王刚等, 2014; 向忠金等, 2016)。④粗面岩岩浆是幔源镁铁质岩浆演化的产物(Holbig et al., 2008; Lucassen et al., 2013)。

紫阳-镇坪地区粗面岩和辉绿岩的地球化学分析表明, 其全碱含量较高, 微量元素均显示大离子亲石元素(LILE)(Rb、Th、U等)和高场强元素(HFSE)(Nb、Ta、Zr、Hf)的相对富集和典型的OIB表现出相似的微量元素和稀土元素特征(图6), 这些特征表明两者不是独立的岩浆起源, 应为同源岩浆演化的产物。目前收集到北大巴山古生代碱性火山岩与基性侵入岩的Nd-Hf同位素数据显示, 两者的 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 、 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值基本一致, 指示了其同源属性($\varepsilon\text{Nd}(t)=+2.0\sim+7.4$ 、 $\varepsilon\text{Hf}(t)=+5.31\sim+8.41$; 张成立, 2007; Zhu et al., 2017; Zhang et al., 2020; Ying et al., 2023; Wu et al., 2023)。实验证明, 地幔橄榄岩直接部分熔融形成的岩浆 SiO_2 含量一般不大于55%(Baker et al., 1995), 本次采集的11件粗面岩类样品 SiO_2 含量(59.11%~65.43%, 平均为61.92%)均大于55%, 表明这些粗面质火山岩不是经过地幔橄榄岩直接部分熔融的产物。粗面质岩浆难以通过普通的地壳岩石部分熔融形成(Montel et al., 1997; Litvinovsky et al., 2000), 但有研究者提出粗面质岩浆可通过高压(>1.5 GPa)环境下增厚下地壳部分熔融形成(Wyllie, 1977; 孟凡超等, 2013)。然而区域资料显示北大巴山地区碱性岩浆岩年龄集中在443~430 Ma(表3), 属于早古生代。该时期北大巴山地区整体处于低压的伸展状态, 缺乏下地壳增厚的构造环境(张成立等, 2007)。此外, 粗面质火山岩的样品Nb/U=39.9~112, 平均为58.77, 该值接近原始地幔(Nb/U=34)以及洋岛玄武岩(46), 而远大于地壳大陆值(9.7; Sun et al., 1989; Rudnick et al., 1995)。同时, Sr/Y值(Sr/Y=1.36~5.3, 平均2.9)较低, 与下地壳增厚部分熔融形成的岩浆(Sr/Y值>40)(Ding et al., 2011)相差较大, 表明粗面质火山岩岩浆受地壳组分影响较小, 并非来自下地壳部分熔融或是壳幔岩浆混合。

研究表明, 一些不相容元素的比值(如Nb/Th、Th/Yb、Nb/Ta、Th/U值)在部分熔融和分馏结晶过程中不受分馏影响, 因此被广泛用作地球化学指标来进行成岩过程的识别(Weaver, 1991; 孟凡超等, 2013)。文中粗面质火山岩的Nb/Th=10.5、Th/Yb=3.9、Nb/Ta=20.0、Th/U=5.7平均比值与辉绿岩(11.7、1.6、19.6、5.8)

相近, 表明二者具有相同的源区, 指示粗面岩来源于幔源玄武质岩浆的分离结晶。粗面质火山岩中Ti和P表现为强烈亏损, 可能与岩浆结晶过程中有大量磷灰石、钛铁矿的分离结晶有关。Sr强烈亏损可能与长石的分离结晶有关。由于Sr在钾长石中所显示的高度相容性(White et al., 2003), 推测受钾长石分离结晶作用或后期热液活动影响, 这与粗面岩样品中普遍存在的钾长石斑晶相一致。

粗面质火山岩与辉绿岩样品全岩呈现出较高的Nb/Ta(15.7~43.9, 平均为19.9)和Zr/Hf(21.1~80.4; 平均为39.3), 接近原始地幔的平均值(Nb/Ta=17.8; Zr/Hf=35.9)(McDonough et al., 1995), 进一步指示基性岩与粗面岩的幔源属性。综上分析, 岚皋-镇坪地区粗面质火山岩应属于基性玄武质岩浆分离结晶的产物。此外, Ta对地壳的混染较为敏感, 地壳混染过程会显著降Ta的含量, 增加岩浆中的Th/Ta和La/Sm值(Niu et al., 2003), 可将其作为地壳混染的指标(Lassiter et al., 1997), 而岚皋-镇坪地区粗面质火山岩及灰绿岩中Nb、Ta富集, Th/Ta(粗面岩平均为2.15; 辉绿岩平均为1.7)和La/Sm(粗面岩平均为6.8; 辉绿岩平均为4.6)比值相近, 表明岩浆结晶过程中没有发生明显的地壳混染, 收集区域内Sr-Nd-Hf同位素数据显示 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 和 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 范围较窄($\varepsilon\text{Nd}(t)=+2.0\sim+7.4$ 、 $\varepsilon\text{Hf}(t)=+5.31\sim+8.41$), Sr同位素比值较低(Zhu et al., 2017; Zhang et al., 2020; Ying et al., 2023; Wu et al., 2023), 进一步表明没有显著的地壳成分混入。

综上所述, 紫阳-镇坪地区粗面质火山岩与辉绿岩岩来源于共同的地幔源区, 基性玄武质岩浆长期分离结晶形成了粗面质火山岩, 演化过程中没有发生明显的地壳混染。

4.3 构造环境

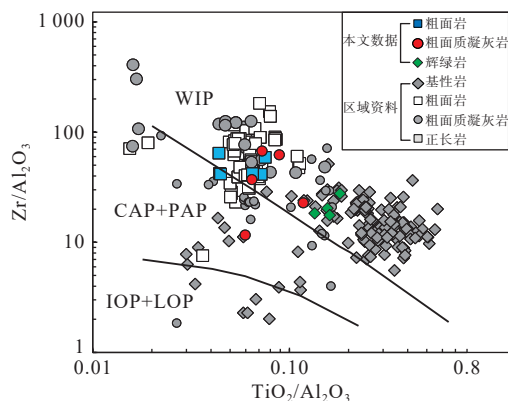
北大巴山紫阳-镇坪地区以基性岩墙(脉)和碱性火山杂岩为主构成本区典型的双峰式火山岩组合(黄月华等, 1992; 张成立等, 2002; 晏云翔, 2005)。然而北大巴山早古生代地层中基性岩墙和碱性火山岩产出的构造背景一直是热议的话题, 目前主要存在有3种观点: ①粗面质火山岩形成构造环境为被动大陆边缘裂谷, 与区域基性岩浆岩构成双峰式组合(黄月华等, 1992; 张成立等, 2002; 晏云翔, 2005)。②地幔柱热动力相关的地幔熔融(张成立等, 2002; 晏云翔, 2005; 许光等, 2018)。③形成于大洋板内构造扬子板块北缘边缘洋盆构造环境(向忠金等, 2010a, 2010b, 2016)。

研究区沉积岩以灰黑色含碳灰岩、浅变质的碳质板岩、砂质板岩以及片岩为主,未发现与俯冲作用相关的沉积地层(王刚等, 2014),显然研究区早古生代构造环境与弧后盆地模式并不匹配。南秦岭北大巴山地区志留纪沉积地层中发现有大量深海还原环境的化石(笔石)(倪世钊等, 1994; 张国伟, 1996),指示了裂谷环境。北大巴山早古生代火山岩-侵入岩组合分布主要呈 NW-SE 走向,与勉略缝合带的总体走向一致,进一步支持裂谷环境,此外这些岩石,显示出高场强元素和轻稀土元素的强烈富集,他们的起源通常归因于被动大陆裂谷环境。在紫阳-镇坪地区超基性-基性岩墙(脉)多呈 NW 向、狭长的带状侵入寒武纪-奥陶纪地层中(图 1c),碱性火山岩近带状分布,区域内未发现有大量中心式喷发的玄武岩地层,也不存在典型的环状火山岩带,不符合地幔柱模式的喷发特征。在岩性组合岩相特征上,北大巴山地区缺乏地幔柱前端特有的拉斑玄武岩组分(王刚等, 2014),进一步表明地幔柱活动不是该区早古生代裂谷形成的主要原因。

区域上及文中碱性火山岩和辉绿岩的样品微量元素分配模式表现出了板内玄武岩的特征,在 $Zr/Al_2O_3-TiO_2/Al_2O_3$ (图 8) 构造环境判别图解中,大部分样品落入板内区域,显示岩石圈拉张减薄的板内环境。北大巴山碱性岩浆活动年龄在 456~399 Ma (表 3),属于晚奥陶世-早志留世。已有研究表明,自元古宙以来北大巴山构造伸展作用从早寒武世一直持续到中

泥盆世,大约经历了 200 Ma 年(何建坤等, 1999)。以时间限定,北大巴山地区基性岩浆侵位及火山喷发形成碱性火山岩时,北大巴山正处于构造伸展阶段。区域上基性岩墙(脉)和火山岩具有碱性岩的特征(图 5),而碱性岩多发育于强烈的地壳伸展构造背景。

大巴山地区广泛发育的寒武纪-奥陶纪东河群是大陆边缘裂谷的典型沉积证据,表明该时期扬子板块北缘经历了强烈的地壳伸展(张国伟等, 1996)。虽然随着华北克拉通下扬子板块的北俯冲,北秦岭在奥陶纪由被动边缘向活动边缘转化(Meng et al., 2000),但奥陶世晚期至志留世早期大巴山地区广泛存在碱性岩浆活动,表明北大巴山地区仍处于大陆伸展和裂陷背景下(Zhang et al., 2017)。南秦岭地区受早古生代持续的区域伸展影响导致软流圈上涌并触发了上地幔的部分熔融。该过程产生的玄武质岩浆经历了不同程度的分离结晶作用,最终侵位或喷发形成了区域内该套早古生代碱性粗面岩-辉绿岩组合(图 9)。



CAP:大陆弧; IOP:初始洋弧; LOP:晚期洋弧; PAP:后碰撞弧;
WIP:板内; 底图据 D. Müller, 1992; 数据来源同表 3

图8 研究区碱性岩及碱中性岩 $TiO_2/Al_2O_3-Zr/Al_2O_3$ 构造环境判别图

Fig. 8 Zr/Al_2O_3 vs. TiO_2/Al_2O_3 tectonic identification plot of alkali and alkali intermediate rocks in the study area

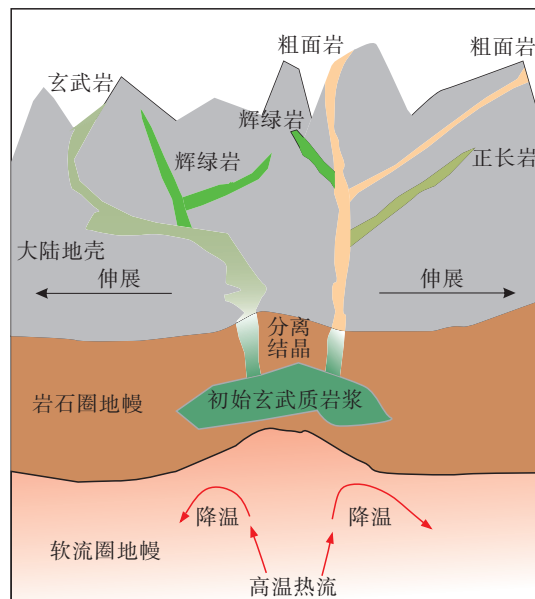


图9 研究区碱性岩(脉)及碱中性火山岩演化模式示意图

Fig. 9 Schematic illustration of the evolution model of basic-rock (vein) and basic-neutral volcanic rocks in the study area

5 结论

(1)紫阳-镇坪地区粗面岩和粗面质凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 442~439 Ma, 为早志留世早期,与区内辉绿岩基本属于同一时期岩浆活动的产物。

(2)南秦岭-北大巴山造山带结合部位紫阳-镇坪地区早古生代碱性粗面岩相对高 Si(SiO_2 含量为 59.11%~65.43%), 富碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 8.40%~11.40%), 低 Ca(CaO 含量为 0.35%~1.89%)、Mg(MgO 含量为 0.64%~3.31%)、Ti(TiO_2 含量为 0.74%~1.67%), 富集 LREE 和 LILE, 指示其经历了较高级的演化。

(3)地球化学特征、岩性组合以及分布规律表明紫阳-镇坪地区粗面岩、粗面质凝灰岩与辉绿岩具有相似或同一源区, 为基性玄武质岩浆不同程度下分离结晶形成, 演化过程中没有发生明显的地壳混染。

(4)紫阳-镇坪地区早古生代碱性火山岩与基性岩墙(脉)形成于大陆板内伸展构造背景下裂谷环境中, 均来源于上地幔部分熔融产生的初始玄武质岩浆经不同程度分离结晶作用演化而来。

参考文献(References):

- 曹亮, 张权绪, 胡尚军, 等. 大巴山南部房县东河辉绿玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其构造意义[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2314-2322.
- CAO Liang, ZHANG Quanxu, HU Shangjun, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Diabase Porphyry from the Donghe Area, Fangxian in South Daba Mountain and Its Tectonic Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2314-2322.
- 陈虹, 田蜜, 武国利, 等. 南秦岭构造带内早古生代碱基性岩浆活动: 古特提斯洋裂解的证据[J]. *地质论评*, 2014, 60(6): 1437-1452.
- CHEN Hong, TIAN Mi, WU Guoli, et al. The Early Paleozoic Alkaline and Marie Magmatic Events in Southern Qinling Belt, Central China: Evidences for the Break-up of the Paleo-Tethyan Ocean[J]. *Geological Review*, 2014, 60(6): 1437-1452.
- 何建坤, 卢华复, 朱斌. 东秦岭造山带南缘北大巴山构造反转及其动力学[J]. *地质科学*, 1999, 34(2): 139-153.
- HE Jiankun, LU Huafu, ZHU Bin. The Tectonic Inversion and Its Geodynamic Processes in Northern Daba Mountains of Eastern Qinling Orogenic Belt[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1999, 34(2): 139-153.
- 黄月华, 任有祥, 夏林圻, 等. 北大巴山早古生代双模式火成岩套: 以高滩辉绿岩和蒿坪粗面岩为例[J]. *岩石学报*, 1992, 8(3): 243-256.
- HUANG Yuehua, REN Youxiang, XIA Linxi, et al. Early Palaeozoic Bimodal Igneous Suite on Northern Daba Mountains Gaotan Diabase and Haoping Trachyte as Examples[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1992, 8(3): 243-256.
- 黄月华, 杨建业. 北大巴山笔架山-铜洞湾碱性镁铁质熔岩的岩石学研究[J]. *西北地质科学*, 1990, (2): 15-24.
- HUANG Yuehua, YANG Jianye. Petrological Study for Bijia-shantongdongwan Alkali-mafic Lavas from Northern Daba Mountains[J]. *Northwest Geoscience*, 1990, (2): 15-24.
- 龙井山, 张贵山, 韩文华, 等. 北大巴山紫阳地区正长斑岩岩墙地球化学特征与锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(4): 681-691.
- LONG Jingshan, ZHANG Guishan, HAN Wenhua, et al. Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Dating of the Syenite Porphyry Dike Swarms in the Ziyang Area in the Northern Daba Mountains[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(4): 681-691.
- 鲁显松, 孙腾, 熊意林, 等. 南秦岭南沟寨钨钽矿床粗面岩锆石 U-Pb 年代学特征及地质意义[J]. *资源环境与工程*, 2021, 35(4): 453-457.
- LU Xiansong, SUN Teng, XIONG Yilin, et al. Zircon U-Pb Geochronology Characteristics and Geological Significance of Coarse Rocks in Nangouzhai Nb-Ta Deposit, South Qinling[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2021, 35(4): 453-457.
- 鲁显松, 黄景孟, 熊意林, 等. 南秦岭土地岭钨钽矿床火山岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学特征及地质意义[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(3): 40-51.
- LU Xiansong, HUANG Jingmeng, XIONG Yilin, et al. Geochemical and Zircon U-Pb Geochronology of the Volcanic Rocks in the TudiLing Nb-Ta deposit, south Qinling Orogenic Belt, and Its Geological Implications[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(3): 40-51.
- 锥昆利, 端木和顺. 大巴山区早古生代基性火成岩的形成时代[J]. *中国区域地质*, 2001, 20(3): 262-266.
- LUO Kunli, DUAN Muheshun. Timing of Early Paleozoic basic igneous rocks in the Daba Mountains[J]. *Regional Geology of China*, 2001, 20(3): 262-266.
- 孟凡超, 刘嘉麒, 崔岩. 松辽盆地徐家围子断陷营城组粗面岩成因与隐爆机制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(3): 704-715.
- MENG Fanchao, LIU Jialin, CUN Yan. Petrogenesis and Crypto-Explosive Mechanism of Trachyte in Yingcheng Formation of Xujiawei Fault Depression, Songliao Basin, NE China[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2013, 43(3): 704-715.
- 倪世钊, 杨德骊, 杨振强, 等. 东秦岭东段南带古生代地及沉积相[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994, 1-80.
- 孟五一, 张振, 高永宝, 等. 南秦岭新发现王庄金矿床矿物成分及其地质意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(4): 157-169.
- MENG Wuyi, ZHANG Zhen, GAO Yongbao, et al. Material Composition and Geological Significance of the Newly Discovered Wangzhuang Gold Deposit in South Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(4): 157-169.

- 冉亚洲,陈涛,梁文天,等.西秦岭郎木寺组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J].西北地质,2024,57(1):110-121.
- RAN Yazhou, CHEN Tao, LIANG Wentian, et al. Zircon U-Pb Age of Volcanic Rocks from the Langmusi Formation in the Western Qinling Mountains and Its Tectonic Significance[J]. North-western Geology, 2024, 57(1): 110-121.
- 万俊,刘成新,杨成,等.南秦岭竹山地区粗面质火山岩地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其大地构造意义[J].地质通报,2016,35(7):1134-1143.
- WAN Jun, LIU Chengxin, YANG Cheng, et al. Geochemical Characteristics and LA-ICP-MS Zircon U-Pb age of the Trachytic volcanic rocks in Zhushan area of Southern Qinling Mountains and their significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(7): 1134-1143.
- 王存智,杨坤光,徐扬,等.北大巴基性岩墙群地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其大地构造意义[J].地质科技情报,2009,28(3):19-26.
- WANG Cunzhi, YANG Kunguang, XU Yang, et al. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the trachytic volcanic rocks in Zhushan area of Southern Qinling Mountains and their significance[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(3): 19-26.
- 王刚,王宗起,张英利,等.北大巴山紫阳地区粗面岩黑云母化学特征及成因意义[J].矿物学报,2014,34(3):343-350.
- WANG Gang, WANG Zongqi, ZHANG Yingli, et al. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the trachytic volcanic rocks in Zhushan area of Southern Qinling Mountains and their significance[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 34(3): 343-350.
- 王宗起,闫全人,闫臻,等.秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[J].地质学报,2009,83(11):1527-1546.
- WANG Zongqi, YAN Quanren, YAN Zhen, et al. New Division of the Main Tectonic Units of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(11): 1527-1546.
- 王一烽,裴先治,李佐臣,等.南秦岭勉略构造带三岔子地区田坝辉绿岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J].西北地质,2021,54(2):1-18.
- WANG Yifeng, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. Geochemical Characteristics, Zircon U-Pb Dating and Geological Significance of Tianba Diabase in Sanchazi Area, Mianlue Tectonic Belt of South Qinling[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(2): 1-18.
- 夏林圻,夏祖春,张诚,等.北大巴山碱质基性-超基性潜火山杂岩岩石地球化学[M].北京:地质出版社,1994,1-226.
- 向忠金,闫全人,宋博,等.北大巴山超基性、基性岩墙和碱质火山杂岩形成时代的新证据及其地质意义[J].地质学报,2016,90(5):896-916.
- XIANG Zhongjin, YAN Quanren, SONG Bo, et al. New Evidence for the Ages of Ultramafic to Mafic Dikes and Alkaline Volcanic Complexes in the North Daba Mountains and Its Geological Implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(5): 896-916.
- 向忠金,闫全人,闫臻,等.北大巴山志留系滔河口组火山碎屑岩相序、组构特征及古火山作用环境分析[J].地质学报,2010a,84(3):311-328.
- XIANG Zhongjin, YAN Quanren, YAN Zhen, et al. Facies Succession and Architecture of Volcaniclastic Rocks of the Taohekou Formation: Implication for Early Silurian Volcanism in the North Dabashan Area, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010a, 84(3): 311-328.
- 向忠金,闫全人,闫臻,等.北大巴山志留系滔河口组碱质斑状玄武岩的岩浆源区及形成环境——来自全岩和辉石斑晶地球化学的约束[J].岩石学报,2010b,26(4):1116-1132.
- XIANG Zhongjin, YAN Quanren, YAN Zhen, et al. Magma source and tectonic setting of the porphyritic alkaline basalts in the Silurian Taohekou Formation, North Daba Mountain: Constraints from the geochemical features of pyroxene phenocrysts and whole rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2010b, 26(4): 1116-1132.
- 许光,王坤明,王宗起,等.北大巴山花栎村镁铁质岩地球化学、年代学及其构造环境制约[J].地质通报,2018,37(7):1279-1290.
- XU Guang, WANG Kunming, WANG Zongqi, et al. Geochemistry and geochronology of Hualicun mafic rocks in North Daba Mountain and tectonic control[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(7): 1279-1290.
- 晏云翔.陕西紫阳-岚皋地区碱-基性岩墙群的岩石地球化学及 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学研究[D].西安:西北大学,2005.
- YAN Yunxiang. Petrogeochemistry and Sr, Nd and Pb isotope geochemistry of alkali-basic dike group in Ziyang-Langao area, Shaanxi Province[D]. Xi'an: Northwest University, 2005.
- 杨航,赖绍聪,秦江锋.北大巴山紫阳-岚皋地区碱性粗面岩地球化学特征:与辉绿岩的成因联系[J].大地构造与成矿学,2021,45(2):413-424.
- YANG Hang, LAI Shaocong, QIN Jiangfeng. Geochemical Characteristics of Alkali Trachytes in Ziyang-Langao Area, North Daba Mountains and Petrogenetic Relation with the Diabases[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(2): 413-424.
- 张成立,高山,袁洪林,等.南秦岭早古生代地幔性质:来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素证据[J].中国科学(D辑),2007,37(7):857-865.
- ZHANG Qisheng, GAO Shan, YUAN Honglin, et al. Early Paleozoic mantle properties in the South Qinling Mountains: Sr-Nd-Pb isotopic evidence from ultramafic, mafic dikes and volcanic rocks[J]. Science in China, Ser. D, 2007, 37(7): 857-865.
- 张成立,高山,张国伟,等.南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学及其地质意义[J].中国科学(D辑:地球科学),2002,

- 32(10): 819–829.
- ZHANG Chengli, GAO Shan, ZHANG Guowei, et al. Geochemistry and geological significance of early Paleozoic alkaline dike group in South Qinling Mountains[J]. *Science in China, Ser. D*, 2002, 32(10): 819–829.
- 张方毅, 赖绍聪, 秦江锋, 等. 北大巴山早古生代辉绿岩地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2020, 39(1): 35–46.
- ZHANG Fangyi, LAI Shaocong, QIN Jiangfeng, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Early Paleozoic alkali diabases in North Daba Mountain[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2020, 39(1): 35–46.
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(3): 193–201.
- ZHANG Guowei, MENG Qingren, YU Zaiping, et al. Orogenic process and dynamic characteristics of Qinling orogenic belt[J]. *Science in China, Ser. D*, 1996, 26(3): 193–201.
- 张国伟, 张本仁, 肖庆辉, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- 张英利, 王宗起, 王刚, 等. 北大巴山地区晚古生代滔河口组碎屑锆石年代学研究及对古生代岩浆事件的限定[J]. *地质学报*, 2016, 90(4): 728–738.
- ZHANG Yingli, WANG Zongqi, WANG Gang, et al. Detrital Zircon Geochronology of the Late Paleozoic Taohekou Formation and Its Constraints on the Paleozoic Magmatic Events in North Daba Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(4): 728–738.
- 赵东宏, 杨忠堂, 李宗会, 等. 秦岭成矿带成矿地质背景及优势矿产成矿规律[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- 张梓尧, 张义虎, 徐磊, 等. 西秦岭宕昌-舟曲地区晚三叠世埃达克质花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(5): 232–247.
- ZHANG Ziyao, ZHANG Yihu, XU Lei, et al. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Late Triassic Adakite Granites in Tanchang-Zhouqu area of West Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 232–247.
- 邹先武, 段其发, 汤朝阳, 等. 北大巴山镇坪地区辉绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征[J]. *中国地质*, 2011, 38(2): 28.
- ZOU Xianwu, DUAN Qifa, TANG Zhaoyang, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating and lithogeochemical characteristics of diabase from Zhenping area in North Daba Mountain[J]. *Geology of China*, 2011, 38(2): 28.
- Baker M B, Hirschmann M M, Ghiorso M S, et al. Compositions of near solidus predictive melts from experiments and thermodynamic calculations[J]. *Nature*, 1995, 375: 308–311.
- Chen Jianlin, Xu Jifeng, Wang Baodi, et al. Origin of Cenozoic alkalinepotassic volcanic rocks at Konglongxiang, Lhasa terrane, Tibetan Plateau: products of partial melting of a mafic lower-crustal source?[J]. *Chemical Geology*, 2010, 273: 286–299.
- Ding L X, Ma C Q, Li J W, et al. Timing and genesis of the adakitic and shoshonitic intrusions in the Laoniushan complex, southern margin of the North China Craton: implications for post-collisional magmatism associated with the Qinling Orogen[J]. *Lithos*, 2011, 126(3–4): 212–232.
- Holbig E S, Grove T L. Mantle melting beneath the Tibetan Plateau: experimental constraints on ultrapotassic magmatism[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2008, 113(B04): 210.
- Jahn B M, Litvinovsky B A, Zandvilevich A N, et al. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: evolution, petrogenesis and tectonic significance[J]. *Lithos*, 2009, 113: 521–539.
- Lassiter J C, DePaolo D J. Plume/lithosphere interaction in the generation of Continental and Oceanic Flood basalts: Chemical and isotopic constraints[J]. *Geophysical Monograph Series*, 1997, 100: 335–355.
- Litvinovsky B A, Steele I M, Wickham S M. Silicic magma formation in overthickened crust: Melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41(5): 717–737.
- Lucassen F, Pudlo D, Franz G, et al. Cenozoic intra-plate magmatism in the Darfur volcanic province: Mantle source, phonolite-trachyte genesis and relation to other volcanic provinces in NE Africa[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2013, 102(1): 183–205.
- Müller D, Rock N M S, Groves D I. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: a pilot study[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1992, 46: 259–289.
- Morrison G W. Characteristics and Tectonic Setting of the Shoshonite Rock Association[J]. *Lithos*, 1980, 13: 97–108.
- Mattauer M, Matte P, Malavieille L, et al. Tectonics of the Qinling Belt: Build-up and evolution of eastern Asia[J]. *Nature*, 1985, 317(6037): 496–500.
- McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120: 223–253.
- Meng Q R, Zhang G W. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, Central China[J]. *Tectonophysics*, 2000, 323: 183–196.
- Middlemost E. A. K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37: 215–224.
- Montel J M, Vielzeuf D. Partial melting of metagreywackes, part II. Compositions of minerals and melts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1997, 128(2–3): 176–196.
- Nie X, Wang Z Q, Chen L, et al. Trachytic magmatism and Nb-rare earth element mineralization in the Pingli area, North Daba Mountain: insights from geochronology and geochemistry[J].

- Geology, 2020, 55: 8225–8243.
- Niu Y L, O'Hara M J. Origin of ocean island basalts: a new perspective from petrology, geochemistry, and mineral physics considerations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B4): 2209.
- Rollinson H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. Taylor and Francis, 2014.
- Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 2002, 184: 123–138.
- Rudnick R L, Fountain D M. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33: 267–309.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- Tchameni R, Mezger K, Nsifa N E, et al. Crustal origin of Early Proterozoic syenites in the Congo Craton (Ntem Complex) South Cameroon[J]. *Lithos*, 2001, 57(1): 23–42.
- Turner S, Arnaud N O, Liu J, et al. Post-collision, Shoshonitic Volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for Convective Thinning of the Lithosphere and the Source of Ocean Island Basalts[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(1): 45–71.
- Wang K M, Wang Z Q, Zhang Y L, et al. Geochronology and geochemistry of mafic rocks in the Xuhe, Shaanxi, China: Implications for petrogenesis and mantle dynamics[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2015, 89(1): 187–202.
- Wang G, Wang Z Q, Zhang Y L, et al. Devonian alkaline magmatism in South Qinling, China: evidence from the Taohekou Formation, Northern Daba Mountain[J]. *International Geology Review*, 2017a, 59(14): 1737–1763.
- Wang K, Wang L X, Ma C Q, et al. Mineralogy and geochemistry of the Zhuxi Nb-rich trachytic rocks, South Qinling (China): Insights into the niobium mineralization during magmatic-hydrothermal processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 138: 104346.
- Wang R R, Xu Z Q, Santosh M, et al. Petrogenesis and tectonic implications of the early Paleozoic intermediate and mafic intrusions in the South Qinling Belt, Central China: constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes[J]. *Tectonophysics*, 2017b, 712(1): 270–288.
- Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104(2–4): 381–397.
- White J C, Holt G S, Parker D F, et al. Trace-element partitioning between alkali feldspar and peralkalic quartz trachyte to rhyolite magma. Part I: Systematics of trace-element partitioning[J]. *American Mineralogist*, 2003, 88(2–3): 316–329.
- Wright J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of nonorogenic granite genesis[J]. *Geological Magazine*, 1969, 106(4): 370–384.
- Wu H, Huang H, Zhang Z, et al. Highly differentiated trachytic magma linked with rare metal mineralization: A case study from the Shuanghekou Nb deposit, South Qinling[J]. *Lithos*, 2023, 438: 106990.
- Wyllie P J. Crustal anatexis: An experimental review[J]. *Tectonophysics*, 1977, 43(1–2): 41–71.
- Xu C, Campbell I H, Allen C M, et al. U–Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of carbonatite and syenite complexes from the Shaxiongdong, China[J]. *Lithos*, 2008, 105(1–2): 118–128.
- Yang H, Lai S C, Qin J F, et al. Early Palaeozoic alkaline trachytes in the North Daba Mountains, South Qinling Belt: petrogenesis and geological implications[J]. *International Geology Review*, 2021, 63(16): 2037–2056.
- Ying Y C, Chen W, Chakhmouradian A R, et al. Textural and compositional evolution of niobium minerals in the Miaoya carbonatite-hosted REE-Nb deposit from the South Qinling Orogen of central China[J]. *Mineralium Deposita*, 2023, 58(1): 97–220.
- Zhang G S, Liu S W, Han W H, et al. Baddeleyite U-Pb age and geochemical data of the mafic dykes from South Qinling: Constraints on the lithospheric extension[J]. *Geological Journal*, 2017, 52(1): 272–285.
- Zhang Y F, Lai S C, Qin F J, et al. Alkali diabbases in the South Qinling Belt, Central China [J]. *Lithos*, 2020, 370–371.
- Zhu Jiang, Wang Lianxun, Peng Sanguo, et al. U-Pb Zircon age, geochemical and isotopic characteristics of the Miaoya syenite and carbonatite complex, central China[J]. *Geological Journal*, 2017, 52(6): 938–954.