

北大巴山早古生代辉绿岩地球化学特征及其地质意义

张方毅, 赖绍聪, 秦江锋, 朱韧之, 杨航, 朱毓

(西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西西安 710069)

摘要: 对南秦岭北大巴山地区广泛分布的一套基性岩墙群中的辉绿岩进行采样, 并进行了锆石 U-Pb 年代学、全岩地球化学分析。结果显示, 岩石形成年龄为 435 ~ 433 Ma, 为早志留世晚期岩浆活动产物。这些辉绿岩具低硅、高碱、高钛的碱性岩特征。岩石微量及稀土元素具板内玄武岩特征, 轻稀土元素相对富集, 轻重稀土元素分异明显, 富集不相容元素 Ba、Nb、Ta, 而 K、Y、Yb 相对亏损; K 及 Rb 的负异常表明岩石源区残留角闪石或金云母, 部分熔融模拟结果显示岩石起源于尖晶石角闪石岩高程度部分熔融。综合地球化学特征及前人研究结果, 认为北大巴山地区在早古生代处于大规模伸展裂陷背景下, 岩石圈的拉张诱发了低熔点的交代岩石圈地幔熔融, 进而形成了这条碱性岩浆带。

关键词: 基性岩墙群; 锆石 U-Pb 定年; 源区性质; 北大巴山

中图分类号: P588.12⁺4; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)01-0035-12

Geochemical characteristics and geological significance of Early Paleozoic alkali diabases in North Daba Mountain

ZHANG Fang-yi, LAI Shao-cong, QIN Jiang-feng, ZHU Ren-zhi, YANG Hang and ZHU Yu

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Early Paleozoic basic dike swarms are widely distributed in North Daba Mountain of South Qinling Belt. This paper reports zircon U-Pb age and whole-rock geochemistry for diabase dikes with the purpose of exploring their petrogenesis and geological significance. The results indicate that the dykes were emplaced during the late period of Early Silurian epoch (435 ~ 433 Ma). These diabases are characterized by low silica but high alkali and titanium content, exhibiting intraplate basalt geochemical characteristics with enrichment of light rare earth elements (LREE) and incompatible trace elements Ba, Nb and Ta but depletion of Rb, K, and heavy rare earth elements (HREE). The negative K and Rb anomalies indicate that amphibole or phlogopite was retained in the mantle source. Partial melting modelling result suggests that diabases were formed by high degrees of partial melting of an enriched spinel hornblende source. In combination with geochemical characteristics and previous studies, the authors hold that the North Daba Mountain experienced large-scale extension during Early Paleozoic, and the extension of lithosphere induced the partial melting of metasomatized lithospheric mantle with low melting point and formed this alkaline magma belt.

Key words: basic dike swarm; zircon U-Pb dating; source region of the magma; North Daba Mountain

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41772052); Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (41421002)

收稿日期: 2019-05-16; 接受日期: 2019-12-03; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772052); 国家自然科学基金委创新群体项目(41421002)

作者简介: 张方毅(1996-), 男, 博士研究生, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: zhangfangyi96@163.com; 通讯作者: 赖绍聪(1963-), 男, 教授, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: shaocong@nwu.edu.cn.

镁铁质岩墙群是大规模伸展、裂解背景下深源岩浆沿张性裂隙上升就位的产物,可形成于裂谷、后碰撞造山带及弧后盆地等多种构造环境下。在地质历史时期,同一时期内大规模的岩墙群被视为超大陆的重建标志(Belica *et al.*, 2014)。这些产于伸展背景下的镁铁质岩墙可以为地球动力学机制、地幔源区属性、地幔地壳相互作用及岩浆演化过程提供重要信息(Zhao and Asimow, 2018)。南秦岭北大巴山地区发育一套由早古生代基性岩墙群及碱性火山岩组成并呈北西-南东向延伸的岩浆杂岩带(夏林圻等, 1994; 张成立等, 2002),该套岩系对研究秦岭早古生代构造演化过程、碱性岩浆作用与早古生代期间扬子北缘大陆裂解事件提供了重要载体。前人已对区内的基性岩墙和碱性火山岩及其携带的幔源捕掳体进行了岩石学、矿物学及地球化学研究(黄月华等, 1992; 黄月华, 1993; 夏林圻等, 1994; 徐学义等, 1996, 1997, 2001; Wang *et al.*, 2015),然而由于碱性岩浆起源的多解性以及区域内岩浆-沉积作用的复杂性导致对该套碱性岩浆岩的具体形成背景仍存在争议。部分学者认为它们是扬子板块北缘被动大陆边缘伸展作用的产物(黄月华等, 1992; 夏林圻等, 1994),也有学者认为该套碱性岩系与早古生代地幔柱活动有关(张成立等, 2002, 2007; Zhang *et al.*, 2017),还有一些学者认为这套基性岩墙和碱质火山杂岩形成于弧后拉伸环境(王宗起等, 2009; Wang *et al.*, 2015)。本文对南秦岭早古生代基性岩墙群中的辉绿岩进行了岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学的系统研究,结合近年来的实验岩石学研究成果及国际上对碱性岩浆起源的全新认识探讨了岩石成因及其地球动力学意义,以期为深入认识秦岭造山带早古生代岩浆作用及构造背景提供进一步的参考和制约。

1 地质背景及样品特征

秦岭造山带是由华北板块与华南板块长期碰撞汇聚而成的复合造山带(张国伟等, 1996; Dong and Santosh, 2016),其与东侧大别-苏鲁造山带及西侧的祁连-昆仑造山带共同组成了中央造山带(Xu *et al.*, 2002)。秦岭造山带被北部的商丹缝合带及南部的勉略缝合带分隔为北秦岭及南秦岭两部分(张国伟等, 2001)。南秦岭在晚古生代之前属于扬子板块北缘的一部分,并接受被动陆缘沉积(Dong and

Santosh, 2016)。

北大巴山位于南秦岭造山带与四川盆地的过渡地区(图 1a),在北大巴山紫阳-岚皋地区分布有大量早古生代碱性岩浆作用形成的岩脉。脉体宽数十米至百余米,长达数百米到数公里不等,整体呈北西-南东向展布,与区域造构线方向一致。岩脉多呈顺层侵入或小角度切割早古生代及之前地层。南秦岭早古生代基性岩墙群主要由辉绿岩及辉长岩组成,集中出露于紫阳县红椿坝-瓦房店断裂以南的早古生代地层中(图 1b)。

对侵入到紫阳县南部早古生代地层中的 4 条代表性新鲜辉绿岩墙进行了样品采集,共获得 8 件辉绿岩脉样品,采样位置见图 1。对 8 件辉绿岩样品进行了全岩主量、微量元素分析,并选取样品 GT-1-1 及 GT-8-1 进行了 LA-ICP-MS 微区锆 U-Pb 定年。

辉绿岩样品整体呈灰绿色,块状构造,具辉绿结构。矿物成分主要由斜长石(50%~60%)和单斜辉石(30%~40%)及少量角闪石(~5%)组成,副矿物有磁铁矿、榍石及磷灰石(图 2a)。斜长石呈自形板条状,正低突起。单斜辉石呈半自形-它形,正高突起,部分辉石中包裹有自形板条状斜长石,构成辉绿结构。此外还有部分辉石呈孤岛状镶嵌于斜长石间隙中,构成岛状辉绿结构。部分样品轻微变质,斜长石发育黏土化,部分单斜辉石被绿泥石取代。样品 GT-7-1(图 2b)呈浅灰绿色,具岛状辉绿结构,与其余样品相比含更低的单斜辉石含量(~20%)及更高的磷灰石含量(~5%)。

2 分析方法

在岩石薄片鉴定的基础上,选取新鲜的、无后期交代脉体贯入的样品,用小型颚式破碎机击碎成直径约 5~10 mm 的细小颗粒,然后用蒸馏水洗净、烘干,最后用玛瑙研钵托盘在振动式碎样机中碎至 200 目。

主量和微量元素在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素采用 XRF 法完成,分析相对误差一般低于 5%。微量元素用 ICP-MS 测定,分析精度和准确度一般优于 10%,详细的分析流程见刘晔等(2007)。

锆石按常规重力和磁选方法分选,最后在双目镜下挑纯,将锆石样品置于环氧树脂中,然后磨至约一半,使锆石内部暴露,锆石样品在测定之前用浓

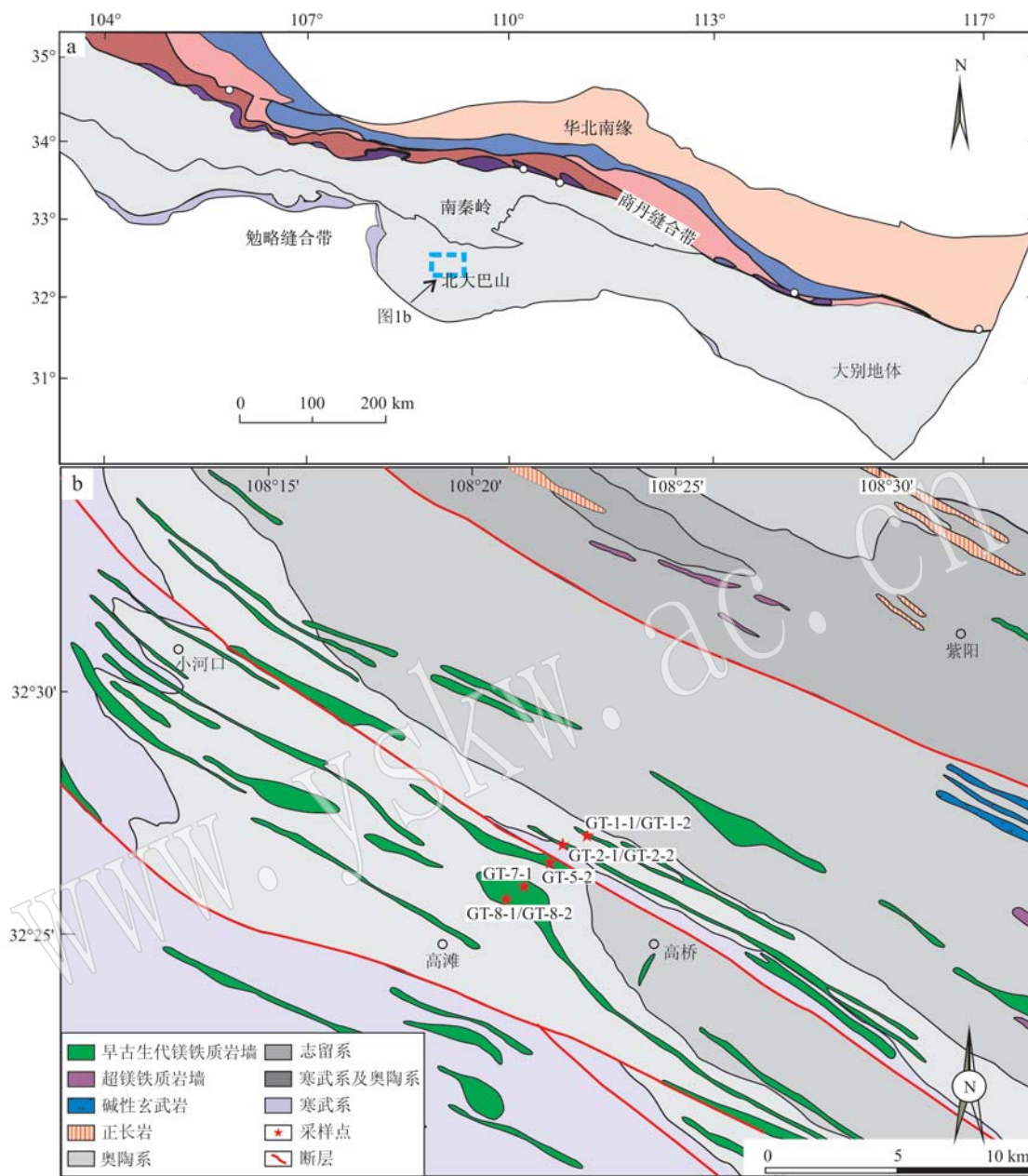


图 1 秦岭造山带构造简图(a, 据 Dong and Santosh, 2016)及北大巴山地区区域地质简图(b, 据陕西省地质局区域地质测量大队十二分队, 1966^①)

Fig. 1 Geographical location of the Qinling area, tectonic framework of the Qinling Orogenic Belt (a, modified after Dong and Santosh, 2016) and the sketch geological map of North Daba Mountain (b, modified after No. 12 Geological Branch Party of Regional Geological Surveying Party, Shaanxi Bureau of Geology, 1966^①)

度为 3% 的稀 HNO₃ 清洗样品表面, 以除去样品表面的污染。锆石的 CL 图像分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的扫描电镜上完成。锆石 U-Pb 同位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重

点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上完成。激光剥蚀系统为配备有 193nmArF-excimer 激光器的 Geolas200 M (Microlas Gottingen Germany), 分析采用激光剥蚀孔径为 30 μm, 激光脉

① 陕西省地质局区域地质测量大队十二分队. 1966. 1:200 000 紫阳幅区域地质图(I-49-XXXI).

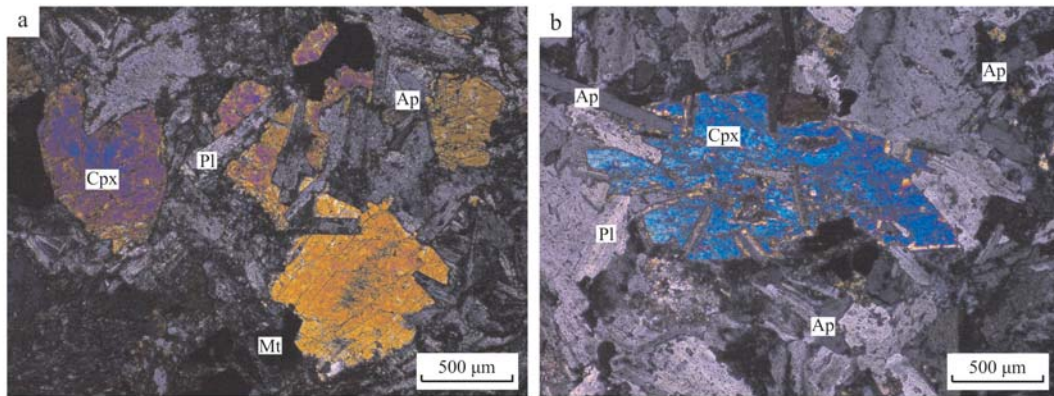


图2 北大巴山辉绿岩正交偏光镜下照片

Fig. 2 Crossed nicols microscopic photos of the diabases from North Daba Mountain

Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石; Ap—磷灰石; Mt—磁铁矿

Cpx—clinopyroxene; Pl—plagioclase; Ap—apatite; Mt—magnetite

冲为 10 Hz, 能量为 32 ~ 36 mJ, 同位素组成用锆石 91500 进行外标校正。LA-ICP-MS 分析的详细方法和流程见 Yuan 等(2010)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

选取高滩地区的 2 个辉绿岩脉样品(图 1b)用于 LA-ICP-MS 微区锆石 U-Pb 定年分析, 分析的结果列于表 1, 锆石的 CL 图像及 U-Pb 年龄谐和图如图 3 所示。

辉绿岩 GT-1-1: 锆石颗粒多呈破碎的长柱状, 粒径为 50 ~ 150 μm , 长宽比为 1:1 ~ 3:1。在 CL 图像中, 锆石颗粒呈深灰色, 并未发育明显韵律环带, 少量锆石颗粒具条带结构, 具基性岩浆锆石的特征(图 3a)。共进行了 22 个数据点分析, 其 $\text{Th} = 166.88 \times 10^{-6} \sim 5\ 818.94 \times 10^{-6}$, $\text{U} = 190.34 \times 10^{-6} \sim 3\ 392.06 \times 10^{-6}$, Th/U 值介于 0.88 ~ 2.63 之间, 为岩浆成因锆石(Hoskin and Black, 2000; Griffin *et al.*, 2004)。大部分数据点都位于谐和线上, 这 22 个点得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 433.5 ± 0.9 Ma (MSWD = 0.87, 2σ)(图 3b), 代表了南秦岭辉绿岩的结晶年龄。

辉绿岩 GT-8-1: 锆石颗粒多呈长柱状自形晶, 粒径为 50 ~ 180 μm , 长宽比为 1:1 ~ 3:1。在 CL 图像中, 锆石颗粒呈深灰色, 无明显的振荡环带结构, 少量锆石颗粒具条带结构, 具基性岩浆锆石的特征(图 3c)。共进行了 17 个数据点分析, 其 $\text{Th} = 704.39 \times 10^{-6} \sim 4\ 837.81 \times 10^{-6}$, $\text{U} = 495.70 \times 10^{-6}$

$\sim 2\ 926.10 \times 10^{-6}$, Th/U 值介于 1.37 ~ 2.76 之间, 为岩浆成因锆石。大部分数据点都位于谐和线上, 这 17 个点得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 435.3 ± 1.4 Ma (MSWD = 1.4, 2σ)(图 3d), 代表了南秦岭辉绿岩的结晶年龄。

3.2 主量元素特征

北大巴山地区辉绿岩脉的主量元素和微量元素分析结果列于表 2, 辉绿岩样品 SiO_2 含量在 39.47% ~ 50.14% 之间, 岩石 TiO_2 含量较高, 为 2.45% ~ 5.86%。 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量为 11.41% ~ 18.34%, MgO 含量为 3.11% ~ 9.85%。岩石全碱含量高, $\text{Na}_2\text{O} = 1.52\% \sim 5.14\%$, $\text{K}_2\text{O} = 0.59\% \sim 1.54\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.90 \sim 4.35$ 。在 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 系列划分图解(图 4)中, 所有样品投影点均位于碱性系列范围内。

岩石 $\text{Mg}^\#$ 值及 SiO_2 含量变化范围较大(分别为 38.8 ~ 60.5 和 39.47% ~ 50.14%), 表明岩石经历了不同程度的分离结晶作用。样品 GT-7-1 具有最高的 SiO_2 含量及低 $\text{Mg}^\#$ 值, 代表了更加分异的熔体。岩相学观察表明该样品中含较少辉石及较多磷灰石(图 2b), 这也造成了其含有较高 P_2O_5 含量及更为富集的微量元素组成。为了更好地约束岩石的源区属性, 在随后的讨论中 $\text{Mg}^\#$ 值小于 40 的样品会被排除。

3.3 微量元素特征

由表 2 所列数据可见, 北大巴山地区辉绿岩稀土元素总量高, 一般在 $96.9 \times 10^{-6} \sim 286.6 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 159.9×10^{-6} 。岩石 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 9.0 ~ 10.8 之间, 平均值为 9.6, 轻重稀土元素分馏较

表 1 高滩地区辉绿岩脉样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据表
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for diabases from North Daba Mountain

测点编号	同位素比值										年龄/Ma					
	$w_B/10^{-6}$					Th/U					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Th	U	Pb	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
GT-1-1	2 918.40	1 109.46	349.12	2.63	0.056 74	0.001 25	0.540 21	0.007 23	0.069 04	0.000 70	480.8	438.6	4.8	430.4	4.3	
GT-1-2	3 179.83	1 805.19	540.09	1.76	0.055 81	0.001 26	0.535 68	0.007 49	0.069 60	0.000 71	444.6	435.6	5.0	433.7	4.3	
GT-1-3	1 242.70	918.80	279.36	1.35	0.055 72	0.001 32	0.531 77	0.008 38	0.069 20	0.000 72	441.0	433.0	5.6	431.3	4.4	
GT-1-4	881.30	618.47	186.86	1.42	0.056 34	0.001 43	0.539 36	0.009 76	0.069 42	0.000 74	465.0	438.0	6.4	432.7	4.5	
GT-1-5	1 100.10	662.58	223.45	1.66	0.056 36	0.001 33	0.543 75	0.008 49	0.069 96	0.000 73	465.7	440.9	5.6	435.9	4.4	
GT-1-6	3 831.34	1 454.40	460.44	2.63	0.055 40	0.001 25	0.530 92	0.007 55	0.069 49	0.000 72	428.0	432.4	5.0	433.1	4.3	
GT-1-7	820.97	582.20	189.63	1.41	0.056 88	0.001 42	0.547 61	0.009 61	0.069 80	0.000 75	486.3	443.4	6.3	435.0	4.5	
GT-1-8	1 902.81	1 049.18	325.34	1.81	0.056 74	0.001 27	0.543 39	0.007 56	0.069 44	0.000 72	480.8	440.7	5.0	432.8	4.3	
GT-1-9	2 148.97	1 319.09	440.35	1.63	0.056 53	0.001 26	0.543 54	0.007 52	0.069 72	0.000 72	472.4	440.8	5.0	434.4	4.3	
GT-1-10	1 574.79	984.92	303.79	1.60	0.056 73	0.001 24	0.544 83	0.007 16	0.069 64	0.000 72	480.2	441.6	4.7	434.0	4.3	
GT-1-11	1 801.88	1 105.04	347.28	1.63	0.056 12	0.001 26	0.538 08	0.007 64	0.069 52	0.000 72	456.6	437.2	5.0	433.3	4.4	
GT-1-12	1 175.45	1 000.44	340.83	1.17	0.056 47	0.001 25	0.546 29	0.007 54	0.070 14	0.000 73	470.1	442.6	5.0	437.0	4.4	
GT-1-13	2 863.48	1 357.57	440.88	2.11	0.055 93	0.001 22	0.533 48	0.007 01	0.069 15	0.000 71	449.3	434.1	4.6	431.0	4.3	
GT-1-14	2 193.02	1 398.56	452.81	1.57	0.055 80	0.001 22	0.537 52	0.007 09	0.069 84	0.000 72	444.0	436.8	4.7	435.2	4.4	
GT-1-15	3 612.73	1 430.36	439.20	2.46	0.055 53	0.001 21	0.537 27	0.007 06	0.070 14	0.000 73	433.5	436.6	4.7	437.0	4.4	
GT-1-16	3 654.72	1 969.77	687.80	1.86	0.056 20	0.001 24	0.542 06	0.007 34	0.069 92	0.000 73	459.6	439.8	4.8	435.7	4.4	
GT-1-17	5 818.94	3 392.06	966.42	1.72	0.055 22	0.001 37	0.524 54	0.009 27	0.068 87	0.000 75	420.8	428.2	6.2	429.3	4.5	
GT-1-18	1 080.15	654.09	228.14	1.65	0.055 22	0.001 30	0.529 82	0.008 45	0.069 55	0.000 74	421.1	431.7	5.6	433.5	4.5	
GT-1-19	1 666.88	190.34	67.56	0.88	0.054 80	0.001 65	0.524 78	0.012 76	0.069 42	0.000 81	404.2	428.3	8.5	432.7	4.9	
GT-1-20	2 771.09	1 384.28	445.68	2.00	0.054 77	0.001 23	0.527 48	0.007 58	0.069 83	0.000 73	402.7	430.1	5.0	435.1	4.4	
GT-1-21	2 128.49	1 118.03	364.83	1.90	0.056 39	0.001 25	0.539 70	0.007 51	0.069 38	0.000 73	467.2	438.2	5.0	432.4	4.4	
GT-1-22	1 140.50	768.96	266.67	1.48	0.056 00	0.001 31	0.535 37	0.008 39	0.069 30	0.000 74	452.2	435.4	5.6	432.0	4.5	
GT-8-1	1 988.32	1 055.02	344.84	1.88	0.055 96	0.001 24	0.545 10	0.007 51	0.070 63	0.000 73	450.5	441.8	4.9	439.9	4.4	
GT-8-2	1 472.92	919.31	298.98	1.60	0.056 64	0.001 34	0.545 67	0.008 72	0.069 85	0.000 74	476.8	442.2	5.7	435.3	4.5	
GT-8-3	2 189.00	1 600.36	479.60	1.37	0.055 89	0.001 25	0.538 07	0.007 54	0.069 80	0.000 73	447.7	437.2	5.0	435.0	4.4	
GT-8-4	2 718.42	986.64	310.60	2.76	0.056 51	0.001 24	0.540 48	0.007 26	0.069 35	0.000 72	471.6	438.7	4.8	432.3	4.3	
GT-8-5	3 585.02	1 390.32	489.10	2.58	0.055 56	0.001 27	0.540 65	0.008 04	0.070 56	0.000 74	434.5	438.9	5.3	439.5	4.5	
GT-8-6	1 895.98	980.12	333.23	1.93	0.054 86	0.001 36	0.527 60	0.009 26	0.069 74	0.000 75	406.3	430.2	6.2	434.6	4.5	
GT-8-7	999.31	701.16	219.57	1.43	0.055 53	0.001 28	0.531 06	0.007 96	0.069 34	0.000 73	433.4	432.5	5.3	432.2	4.4	
GT-8-8	1 766.89	1 039.13	315.53	1.70	0.057 04	0.001 36	0.545 62	0.008 79	0.069 36	0.000 74	492.5	442.1	5.8	432.3	4.4	
GT-8-9	960.14	561.12	179.78	1.71	0.056 29	0.001 29	0.546 68	0.008 07	0.070 42	0.000 74	463.1	442.8	5.3	438.7	4.4	
GT-8-10	962.28	696.99	208.92	1.38	0.056 76	0.001 45	0.543 03	0.010 04	0.069 37	0.000 75	481.7	55.5	440.4	6.6	432.3	4.5
GT-8-11	1 334.76	956.39	313.54	1.40	0.055 65	0.001 29	0.537 64	0.008 26	0.070 06	0.000 74	438.1	50.6	436.9	5.5	436.5	4.4
GT-8-12	1 598.65	789.63	253.65	2.02	0.054 96	0.001 23	0.534 04	0.007 47	0.070 46	0.000 73	410.6	48.4	434.5	4.9	438.9	4.4
GT-8-13	704.39	495.70	172.90	1.42	0.055 35	0.001 41	0.530 37	0.009 81	0.069 48	0.000 75	426.1	55.4	432.1	6.5	433.0	4.5
GT-8-14	4 837.81	2 926.10	885.49	1.65	0.055 57	0.001 18	0.534 56	0.006 52	0.069 76	0.000 71	434.8	46.1	434.8	4.3	434.7	4.3
GT-8-15	1 438.01	896.39	306.96	1.60	0.054 82	0.001 25	0.530 17	0.007 84	0.070 13	0.000 73	404.9	49.9	431.9	5.2	436.9	4.4
GT-8-16	1 309.81	760.29	249.99	1.72	0.054 22	0.001 28	0.521 53	0.008 34	0.069 75	0.000 73	380.2	52.2	426.2	5.6	434.6	4.4
GT-8-17	1 249.96	810.38	257.86	1.54	0.054 79	0.001 21	0.525 76	0.007 25	0.069 59	0.000 72	403.5	48.5	429.0	4.8	433.7	4.3

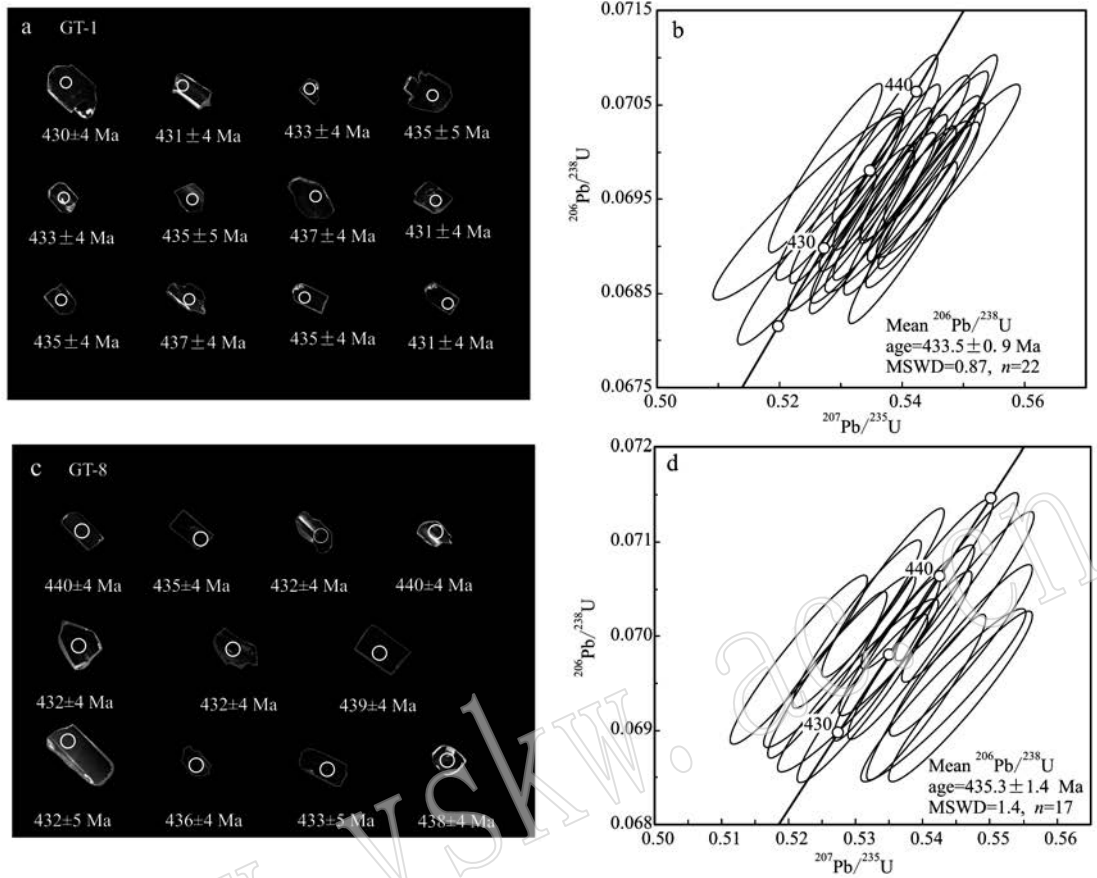


图3 北大巴山辉绿岩锆石阴极发光(CL)图(a,c)和U-Pb年龄谐和图(b,d)
 Fig. 3 Zircon cathodoluminescence (CL) images for the diabases from the North Daba Mountain (a, c) and zircon U-Pb concordia diagram for the diabases from North Daba Mountain (b, d)

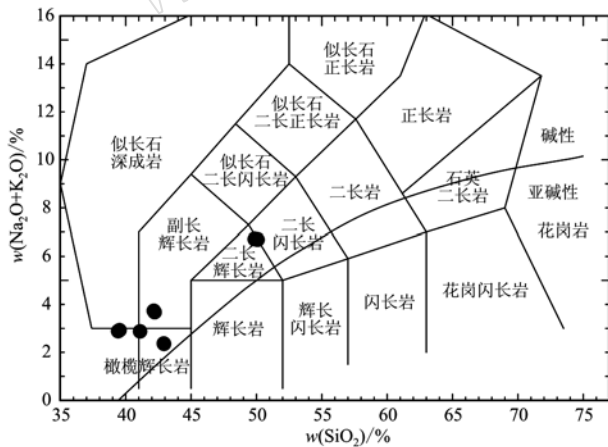


图4 北大巴山地区辉绿岩TAS分类图(据Middlemost, 1994)
 Fig. 4 Total alkali versus SiO₂ (TAS) diagram for SQB diabases (after Middlemost, 1994)

为明显。(Tb/Yb)_N 值介于 2.3 ~ 2.6 之间, 平均值为 2.4。具微弱 Eu 正异常, Eu/Eu* 值在 1.07 ~ 1.25 之间。

在球粒陨石标准化配分图(图 5a)上, 本区辉绿岩具右倾负斜率轻稀土元素富集型配分模式, 与典型的板内玄武岩稀土元素地球化学特征基本一致。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5b)中, 所有样品显示出富集强不相容元素 Ba、Sr、Nb 和 Ta, 而亏损 Rb、K、Zr 和 Hf 的分布特点, 总体上具有板内玄武岩微量元素的一般特征。

4 讨论

4.1 岩浆起源和源区性质

北大巴山早古生代辉绿岩墙具有明显的贫 SiO₂ (<45%) 富 Na₂O (>1.5%) 同时富 TiO₂ (>2%) 及不相容元素的碱性岩浆特征。实验岩石学结果表明, 在高压下地幔橄榄岩趋向于更低程度的部分熔融进而产生富碱贫硅的熔体(Kushiro, 1996; Wasylenki *et al.*, 2003), 低程度熔体同时也会导致大量

表 2 北大巴山辉绿岩主量($w_B/\%$)及微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element concentrations of the diabases from North Daba Mountain

样品编号	GT-1-1	GT-1-2	GT-2-1	GT-2-2	GT-5-2	GT-7-1	GT-7-1R	GT-8-1	GT-8-2
SiO ₂	42.27	42.20	39.58	39.47	41.15	49.92	50.14	42.98	42.97
TiO ₂	5.57	5.86	5.46	5.54	5.82	2.45	2.45	3.11	3.06
Al ₂ O ₃	13.49	13.41	14.34	14.29	11.55	15.69	15.79	13.36	13.16
Fe ₂ O ₃ ^T	16.93	16.91	17.72	17.77	18.34	11.41	11.41	14.37	14.98
MnO	0.21	0.22	0.20	0.19	0.21	0.24	0.24	0.19	0.18
MgO	5.35	5.33	5.67	5.67	7.10	3.14	3.11	9.35	9.85
CaO	9.83	9.66	10.40	10.56	10.02	6.75	6.68	10.45	9.79
Na ₂ O	2.96	3.00	2.28	2.26	2.05	5.14	5.12	1.52	1.59
K ₂ O	0.68	0.70	0.61	0.59	0.79	1.54	1.54	0.80	0.75
P ₂ O ₅	0.46	0.47	0.33	0.32	0.41	0.94	0.95	0.38	0.38
LOI	2.01	2.16	2.93	3.20	2.07	2.29	2.30	3.36	2.80
TOTAL	99.76	99.92	99.52	99.86	99.51	99.51	99.73	99.87	99.51
Mg [#]	42.4	42.3	42.7	42.6	47.4	39.1	38.8	60.3	60.5
Li	17.9	18.1	23.1	22.7	19.9	14.2	14.6	42.0	46.4
Be	0.94	0.95	0.63	0.62	0.89	2.12	2.12	0.97	0.92
Sc	23.8	24.0	26.8	27.3	30.0	10.2	10.2	23.4	22.2
V	459	461	534	532	578	122	122	323	319
Cr	4.10	4.02	3.36	3.38	51.40	2.39	2.30	219.00	216.00
Co	52.9	52.8	76.0	74.7	75.4	27.8	27.4	63.6	72.6
Ni	2.62	2.50	21.80	21.70	111.00	1.07	1.07	121.00	137.00
Cu	26.30	26.80	37.90	37.40	176.00	8.12	7.98	44.90	43.30
Zn	140	140	118	115	243	151	151	128	131
Ga	22.6	22.6	22.4	22.2	20.6	26.8	27.0	20.3	19.9
Ge	1.43	1.42	1.40	1.38	1.51	1.59	1.61	1.39	1.35
Rb	14.3	14.4	12.0	11.9	28.1	35.7	35.3	36.1	37.3
Sr	727	730	757	754	657	347	347	1 127	991
Y	23.4	23.3	17.5	17.6	23.5	44.0	43.9	23.1	23.3
Zr	148	150	107	113	133	313	316	162	165
Nb	30.1	30.4	19.8	19.8	21.4	49.0	48.6	24.4	24.3
Cs	0.87	0.88	1.05	1.04	2.68	1.75	1.74	5.76	7.14
Ba	281	282	375	376	691	481	479	260	223
La	22.0	21.7	15.6	15.4	22.3	49.6	49.3	22.5	22.9
Ce	49.3	48.7	35.4	34.9	49.8	110.0	110.0	49.7	50.5
Pr	6.59	6.53	4.75	4.70	6.63	14.40	14.40	6.50	6.59
Nd	29.7	29.5	21.7	21.5	29.7	61.9	62.1	28.6	29.1
Sm	6.80	6.75	5.04	5.02	6.62	12.80	12.80	6.38	6.41
Eu	2.61	2.59	2.02	2.03	2.31	4.42	4.40	2.23	2.21
Gd	6.63	6.60	5.01	4.95	6.45	12.10	12.10	6.21	6.22
Tb	0.92	0.92	0.70	0.69	0.90	1.70	1.69	0.88	0.89
Dy	4.98	4.99	3.79	3.74	4.93	9.27	9.21	4.86	4.86
Ho	0.89	0.89	0.67	0.67	0.89	1.68	1.67	0.88	0.89
Er	2.22	2.22	1.67	1.66	2.24	4.28	4.29	2.27	2.28
Tm	0.28	0.29	0.22	0.21	0.30	0.56	0.56	0.30	0.30
Yb	1.64	1.64	1.22	1.23	1.72	3.31	3.32	1.76	1.76
Lu	0.23	0.23	0.17	0.17	0.24	0.47	0.46	0.25	0.25
Hf	3.84	3.88	2.89	2.98	3.53	7.34	7.38	4.10	4.20
Ta	2.08	2.11	1.34	1.33	1.47	3.10	3.08	1.59	1.60
Pb	2.48	2.41	8.28	8.28	9.31	10.60	11.50	8.64	8.76
Th	1.83	1.86	1.23	1.34	2.23	4.93	4.92	2.27	2.38
U	0.42	0.44	0.30	0.36	0.52	1.21	1.20	0.57	0.60
ΣREE	134.9	133.5	98.0	96.9	135.1	286.6	285.8	133.3	135.1
(La/Yb) _N	9.6	9.5	9.2	9.0	9.3	10.8	10.7	9.1	9.3
(Tb/Yb) _N	2.6	2.5	2.6	2.6	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3
Eu/Eu*	1.19	1.19	1.23	1.25	1.08	1.09	1.08	1.08	1.07

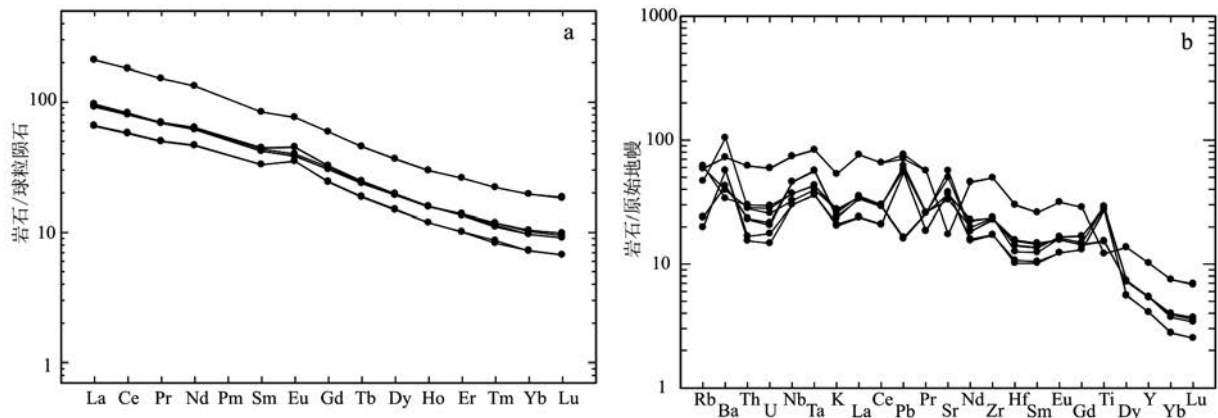


图5 北大巴山辉绿岩稀土元素配分图解(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle (PM) normalized trace element spidergrams (b) for the diabases from North Daba Mountain

球粒陨石标准化值据 Sun and McDonough (1989), 原始地幔标准化值据 McDonough and Sun (1995) chondrite and primitive mantle data after Sun and McDonough (1989) and McDonough and Sun (1995) respectively

强不相容元素进入熔体中。地幔橄榄岩的低程度熔融可以解释南秦岭碱质基性岩脉富碱及富集不相容元素的特征, 然而 Ti 为中度不相容元素, 其在岩浆中的含量更多地受源区含量控制。正常的地幔橄榄岩(亏损地幔、原始地幔)中含有较低的 TiO_2 含量, 即使是极低程度的部分熔融也不能产生高钛的岩浆 (Prytulak and Elliott, 2007)。要产生富钛的岩浆就需要源区含有特殊的富集组分(如辉石岩或角闪石岩)。在微量元素蛛网图中, 所有样品均出现 K 的负异常暗示源区存在富钾角闪石或金云母的残留 (Panter *et al.*, 2006, 2018; Sprung *et al.*, 2007)。部分熔融实验结果表明与角闪石平衡的熔体为钠质, 而与金云母平衡的熔体则为富钾熔体 (Médard *et al.*, 2006; Pilet *et al.*, 2008; Condamine and Médard, 2014), 南秦岭基性岩脉富钠 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.90 \sim 4.35$) 的特征指示角闪石是更可能的源区组分。在地幔中, 角闪石储存着大量的不相容元素(大离子亲石元素及高场强元素)和 Ti, 源区存在角闪石也为南秦岭辉绿岩富集强不相容元素, 富 Ti 及富 Nb、Ta 的特征提供了解释。黄月华等(1992)在南秦岭岚皋地区碱质基性-超基性潜火山杂岩中发现了含大量含水矿物的金云角闪辉石岩类捕掳体, 这些地幔捕掳体的发现也为南秦岭辉绿岩源区存在角闪石提供了支持。矿物学研究结果表明角闪石及金云母等含水矿物具较低的熔点, 并不能在高温的软流圈地幔中稳定存在 (Green *et al.*, 2010), 因此部分

熔融发生于温度较低的岩石圈地幔内。

岩石中稀土元素的 La/Yb 及 Tb/Yb 值的相关关系可以有效地判别岩浆起源的相对深度及熔融程度。在地幔部分熔融过程中, 轻稀土元素与重稀土元素比值 (La/Yb) 主要受部分熔融程度控制, 而中稀土元素与重稀土元素比值 (Tb/Yb) 则主要受控于源区是否残留石榴子石。为了确定岩浆的起源深度及部分熔融程度, 本文采用了批次部分熔融模拟算法 (Shaw, 1970), 源区成分采用岚皋地区角闪石岩捕掳体, 而部分熔融反应则参考了 Pilet 等 (2008) 角闪石岩部分熔融实验结果。计算结果表明南秦岭辉绿岩为尖晶石相角闪石岩高程度部分熔融产物 ($\approx 60\%$, 图 6)。部分熔融实验表明角闪石会在固相线上约 50°C 被完全耗尽 (60% 熔融), 这与本文的模拟结果十分吻合, 也验证了计算结果的合理性。

4.2 构造环境与大地构造意义

北大巴山辉绿岩富碱富钛及微量元素配分模式表现出了板内碱性玄武岩的特征, 在 $\text{Zr}/\text{Y} - \text{Zr}$ 图解 (图 7a) 中, 南秦岭地区辉绿岩样品落入板内玄武岩区域内。在 $2 \text{Nb} - \text{Zr}/4 - \text{Y}$ 图解 (图 7b) 中, 样品落在板内裂谷玄武岩区, 这些特征表明南秦岭辉绿岩形成于板内构造环境。

南秦岭区域内早古生代岩浆活动主要由基性岩墙群 (王存智等, 2009; 邹先武等, 2011; 陈虹等, 2014)、碱性玄武岩 (向忠金等, 2010) 及粗面岩 (万俊等, 2016) 组成, 后两者构成了该区域内双峰式火

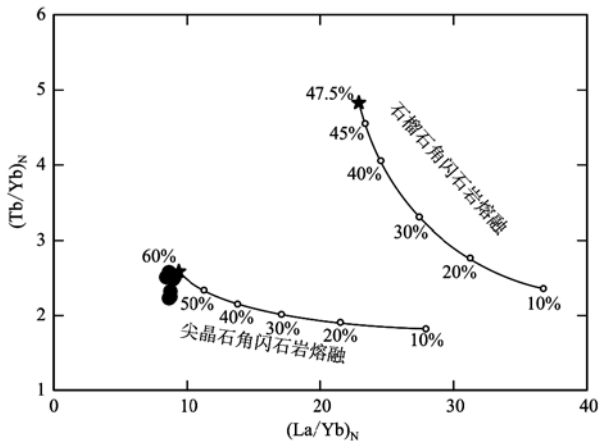


图 6 $(Tb/Yb)_N - (La/Yb)_N$ 图解

Fig. 6 $(Tb/Yb)_N$ versus $(La/Yb)_N$ for the diabases from the North Daba Mountain

山岩组合(黄月华等, 1992)。目前对于这套南秦岭构造带南缘内广泛分布的碱性岩石组合的形成背景仍没有统一的认识。本文研究认为北大巴山辉绿岩产自富角闪石的地幔源区, 而富含角闪石的交代岩石圈地幔具有很低的熔点(Foley *et al.*, 1999), 地幔柱活动背景下极高的地温不止会诱发交代岩石圈地幔的熔融, 同时也会导致地幔橄榄岩的熔融从而产生大规模拉斑玄武岩系列。南秦岭早古生代的岩浆活动明显缺失大陆拉斑玄武岩系列, 说明该套碱性岩浆并非大规模地幔柱活动的产物。

北大巴山辉绿岩脉的野外产状体现了大规模顺层侵位的特点, 而碱性岩浆脉体顺构造薄弱层侵位则与伸展或裂谷活动密切相关(Gudmundsson and Loetveit, 2005; 陈虹等, 2014)。前人研究表明自新元古代中期开始, 南秦岭区及扬子北缘由总体的汇聚转向大规模的伸展裂解, 代表了全球性的 Rodinia 超大陆裂解事件在中国大陆的响应(张国伟等, 2001)。这一伸展拉张作用在南秦岭构造带内一直持续到早古生代末, 表现为勉略缝合带和武当地块的新元古代中晚期基性岩墙群(Zhao and Asimow, 2018), 在其上又叠加了早古生代镁铁质岩脉(赵国春等, 2003; Nie *et al.*, 2016)。在北大巴山岚皋地区与火山岩互层的沉积岩中发现丰富的笔石及牙形石化石也证明在早古生代南秦岭地区发育有富碳富硅裂谷盆地(锥昆利等, 2001), 这些证据指示早古生代南秦岭地区处于大规模伸展裂陷背景下。交代的岩石圈地幔由于其富水富挥发分的特性具有较低的熔点, 在岩石圈的伸展导致岩石圈地幔中的“交代体”熔融从而产生富碱富钛的基性岩浆(Pilet, 2015)。这些碱性熔体沿着断裂带侵入地壳并形成了南秦岭这条颇具规模的基性岩墙群带。

5 结论

(1) 南秦岭辉绿岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为

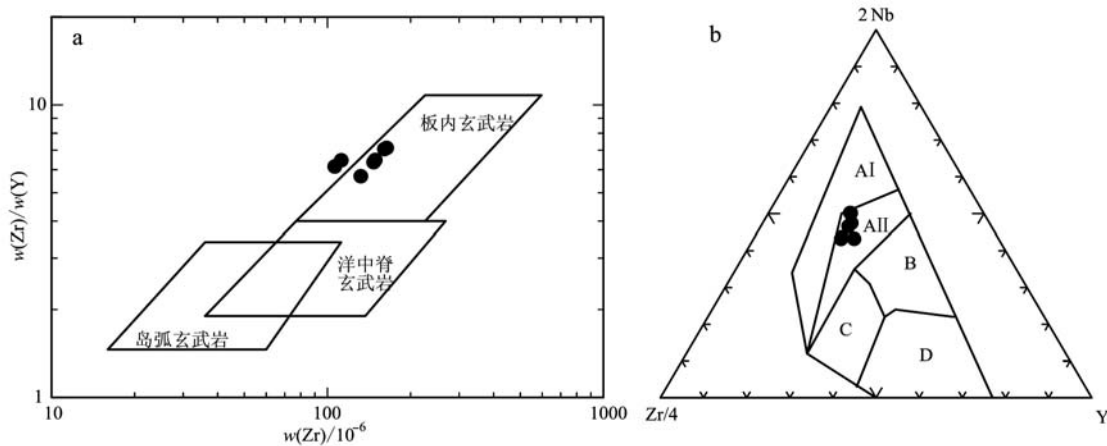


图 7 北大巴山辉绿岩 $Zr/Y - Zr$ (a, 据 Pearce, 1982) 和 $2Nb - Zr/4 - Y$ (b, 据 Meschede, 1986) 构造环境判别图
Fig. 7 $Zr/Y - Zr$ (a, after Pearce, 1982) and $2Nb - Zr/4 - Y$ (b, after Meschede, 1986) tectonic discrimination diagrams for the diabases from North Daba Mountain

A I + A II—板内碱性玄武岩; A II + C—板内拉斑玄武岩; B—富集型洋中脊玄武岩; D—N 型洋中脊玄武岩; C + D—火山弧玄武岩
A I + A II—ultraplate alkaline basalt; A II + C—ultraplate tholeiitic basalt; B—E-MORB; D—N-MORB; C + D— island arc basalt

435 ~ 433 Ma, 形成于早志留世晚期。

(2) 主量元素及微量元素特征表明南秦岭辉绿岩为富角闪石的岩石圈地幔高程度部分熔融产物。

(3) 南秦岭地区早古生代碱性岩浆活动并非由地幔柱活动引发, 而是由岩石圈伸展背景下受交代的岩石圈地幔低温下部分熔融形成。

致谢 匿名审稿人及编辑在文章修改过程中提供了建设性的意见, 在此致以诚挚的感谢。

References

- Belica M E, Piispa E J, Meert J G, *et al.* 2014. Paleoproterozoic mafic dyke swarms from the Dharwar craton; Paleomagnetic poles for India from 2. 37 to 1. 88 Ga and rethinking the Columbia supercontinent [J]. *Precambrian Research*, 244: 100 ~ 122.
- Chen Hong, Tian Mi, Wu Guoli, *et al.* 2014. The Early Paleozoic alkaline and mafic magmatic events in Southern Qinling Belt, Central China: Evidences for the break-up of the Paleo-Tethyan ocean[J]. *Geological Review*, 60(6): 1 437 ~ 1 452 (in Chinese with English abstract).
- Condamine P and Médard E. 2014. Experimental melting of phlogopite-bearing mantle at 1 GPa: Implications for potassic magmatism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 397: 80 ~ 92.
- Dong Y P and Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 29: 1 ~ 40.
- Foley S F, Musselwhite D S and van der Laan S R. 1999. Melt compositions from ultramafic vein assemblages in the lithospheric mantle: A comparison of cratonic and non-cratonic settings [A]. Gurney J J, Gurney J L, Pascoe M D, *et al.* *Proceedings of the 7th International Kimberlite Conference; Volume 1* [C]. Cape Town: Red Roof Design, 238 ~ 246.
- Green D H, Hibberson W O, Kovács I, *et al.* 2010. Water and its influence on the lithosphere asthenosphere boundary[J]. *Nature*, 467: 448 ~ 451.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, *et al.* 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131(3 ~ 4): 231 ~ 282.
- Gudmundsson A and Loetveit I F. 2005. Dyke emplacement in a layered and faulted rift zone[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 144(1 ~ 4): 311 ~ 327.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423 ~ 439.
- Huang Yuehua. 1993. Mineralogical characteristics of phlogopite-amphibole-pyroxenite mantle xenoliths included in the alkali mafic-ultramafic subvolcanic complex from Langao county, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 367 ~ 378 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yuehua, Ren Youxiang, Xia Linqi, *et al.* 1992. Early Palaeozoic bimodal igneous suite on northern DABA mountains—Gaotan diabase and Haoping trachyte as examples[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 8(3): 243 ~ 256 (in Chinese with English abstract).
- Kushiro I. 1996. Partial melting of a fertile peridotite at high pressure: An experimental study using aggregates of diamond in Earth processes: Reading the isotope code[J]. *Geophysical Monograph, American Geophysical Union*, 95: 109 ~ 122.
- Liu Ye, Liu Xiaoming, Hu Zhaochu, *et al.* 2007. Evaluation of accuracy and long-term stability of determination of 37 trace elements in geological samples by ICP-MS[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1 203 ~ 1 210 (in Chinese with English abstract).
- Luo Kunli and Duanmu Heshun. 2001. Timing of early Paleozoic basic igneous rocks in the Daba mountains[J]. *Regional Geology of China*, 8(3): 262 ~ 266 (in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120: 223 ~ 253.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental thoeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 56: 207 ~ 218.
- Médard E, Schmidt M W, Schiano P, *et al.* 2006. Melting of amphibole-bearing wehrlites: An experimental study on the origin of ultra-calcic nepheline-normative melts[J]. *Journal of Petrology*, 47(3): 481 ~ 504.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Review*, 37: 215 ~ 224.
- Nie H, Wan X, Zhang H, *et al.* 2016. Ordovician and Triassic mafic dykes in the Wudang terrane: Evidence for opening and closure of the South Qinling ocean basin, central China[J]. *Lithos*, 266 ~ 267: 1 ~ 15.
- Panter K S, Blusztajn J, Hart S, *et al.* 2006. The origin of HIMU in the SW Pacific: Evidence from intraplate volcanism in Southern New Zealand and Subantarctic Islands[J]. *Journal of Petrology*, 47(9): 1 673 ~ 1 704.
- Panter K S, Castillo P, Krans S, *et al.* 2018. Melt origin across a rifted

- continental margin: A case for subduction-related metasomatic agents in the lithospheric source of alkaline basalt, northwest Ross Sea, Antarctica[J]. *Journal of Petrology*, 59: 517 ~ 558.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[A]. Thorpe R S. *Andesite: Orogenic Andesite and Related Rocks*[C]. New York: John Wiley, 525 ~ 548.
- Pilet S. 2015. Generation of low-silica alkaline lavas: petrological constraints, models and thermal implications[A]. Foulger G R, Lustrino M and King S. *The Interdisciplinary Earth: In Honor of Don L. Anderson*[C]. Geological Society of America, Special Papers, 514 ~ 517.
- Pilet S, Baker M B and Stolper E M. 2008. Metasomatized lithosphere and the origin of alkaline lavas[J]. *Science*, 320(5 878): 916 ~ 919.
- Prytulak J and Elliott T. 2007. TiO₂ enrichment in ocean island basalts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 263(3 ~ 4): 388 ~ 403.
- Shaw D M. 1970. Trace element fractionation during anatexis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(2): 237 ~ 243.
- Sprung P, Schuth S, Münker C, *et al.* 2007. Intraplate volcanism in new zealand: the role of fossil plume material and variable lithospheric properties[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153: 669 ~ 687.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society Special Publication*, 42: 313 ~ 345.
- Wan Jun, Liu Chengxin, Yang Cheng, *et al.* 2016. 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*, 35(7): 1 134 ~ 1 143 (in Chinese with English abstract).
- Wang Cunzhi, Yang Kunguang, Xu Yang, *et al.* 2009. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb age of basic dike swarms in north DABA mountains and its tectonic significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 28 (3): 19 ~ 26 (in Chinese with English abstract).
- Wang K M, Wang Z Q, Zhang Y L, *et al.* 2015. Geochronology and geochemistry of mafic rocks in the Xuhe, Shaanxi, China: Implications for petrogenesis and mantle dynamics [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(1): 187 ~ 202.
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, *et al.* 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling orogenic belt, Central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1 527 ~ 1 546 (in Chinese with English abstract).
- Wasylenki L E, Baker M B, Kent A J R, *et al.* 2003. Near-solidus melting of the shallow upper mantle: partial melting experiments on depleted peridotite [J]. *Journal of Petrology*, 44(7): 1 163 ~ 1 191.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Zhang Cheng, *et al.* 1994. Petro-geochemistry of Alkali Mafic-ultramafic Subvolcanic Complex in Northern Daba Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 62 ~ 95 (in Chinese).
- Xiang Zhongjin, Yan Quanren, Yan Zhen, *et al.* 2010. 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 Petrologica Sinica*, 26(4): 1 116 ~ 1 132 (in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Castillo P R, Li X H, *et al.* 2002. MORB-type rocks from the Paleo-Tethyan Mian-Lueyang northern ophiolite in the Qinling Mountains, central China: Implications for the source of the low ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb and high ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd mantle component in the Indian Ocean [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 198(3 ~ 4): 323 ~ 337.
- Xu Xueyi, Huang Yuehua, Xia Linqi, *et al.* 1996. Characteristics of phlogopite-amphibole pyroxenite xenoliths from Langao County, Shaanxi Province [J]. *Acta Petrologica and Mineralogica (in Chinese with English abstract)*.
- Xu Xueyi, Huang Yuehua, Xia Linqi, *et al.* 1997. Phlogopite-amphibole-pyroxenite xenoliths in Langao, Shaanxi Province, China: Evidence for mantle metasomatism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 318 ~ 329 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Xia Linqi, Xia Zuchun, *et al.* 2001. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Early Paleozoic alkali lamprophyre complex from Langao County [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1): 55 ~ 106 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, *et al.* 2010. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry [J]. *Geostandards & Geoanalytical Research*, 28(3): 353 ~ 370.
- Zhang Chengli, Gao Shan, Yuan Honglin, *et al.* 2007. Sr-Nd-Pb isotopes of the Early Paleozoic mafic-ultramafic dykes and basalts from South Qinling belt and their implications for mantle composition [J]. *Science in China (Series D)*, 37(7): 857 ~ 865 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Gao Shan, Zhang Guowei, *et al.* 2002. Geochemistry of early Paleozoic alkali dyke swarms in south Qinling and its geological significance [J]. *Science in China (Series D)*, 32(10): 819 ~ 829

(in Chinese with English abstract).

- Zhang G S, Liu S W, Han W H, *et al.* 2017. Baddeleyite U-Pb age and geochemical data of the mafic dykes from South Qinling: Constraints on the lithospheric extension[J]. *Geological Journal*, 52(51): 272 ~ 285.
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, *et al.* 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling Orogen[J]. *Science in China(Series D)*, 26(3): 193 ~ 200(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 855(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guochun, Hu Jianmin and Meng Qingren. 2003. Geochemistry of the basic sills in the western wudang block: The evidences of the Paleozoic underplating in south Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 612 ~ 522(in Chinese with English abstract).
- Zhao J H and Asimov P D. 2018. Formation and evolution of a magmatic system in a rifting continental margin: The Neoproterozoic arc- and MORB-like dike swarms in South China[J]. *Journal of Petrology*, 59: 1 811 ~ 1 844.
- Zou Xianwu, Duan Qifa, Tang Chaoyang, *et al.* 2011. SHRIMP zircon U-Pb dating and lithochemical characteristics of diabase from Zhenping area in North Daba Mountain[J]. *Geology in China*, 38(2): 282 ~ 291(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈虹, 田蜜, 武国利, 等. 2014. 南秦岭构造带内早古生代碱性岩浆活动: 古特提斯洋裂解的证据[J]. *地质论评*, 60(6): 1 437 ~ 1 452.
- 黄月华. 1993. 岚皋碱性镁铁-超镁铁质潜火山杂岩中金云角闪辉石岩类地幔捕虏体矿物学特征[J]. *岩石学报*, 9(4): 367 ~ 378.
- 黄月华, 任有祥, 夏林圻, 等. 1992. 北大巴山早古生代双模式火成岩套——以高滩辉绿岩和嵩坪粗面岩为例[J]. *岩石学报*, 8(3): 243 ~ 256.
- 刘晔, 柳小明, 胡兆初, 等. 2007. ICP-MS 测定地质样品中 37 个元素的准确度和长期稳定性分析[J]. *岩石学报*, 23(5): 1 203 ~ 1 210.
- 雒昆利, 端木和顺. 2001. 大巴山区古生代基性火成岩的形成时代[J]. *中国区域地质*, 8(3): 262 ~ 266.
- 万俊, 刘成新, 杨成, 等. 2016. 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*, 35(7): 1 134 ~ 1 143.
- 王存智, 杨坤光, 徐扬, 等. 2009. 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*, 28(3): 19 ~ 26.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 等. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分[J]. *地质学报*, 83(11): 1 527 ~ 1 546.
- 夏林圻, 夏祖春, 张诚, 等. 1994. 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, 62 ~ 75.
- 向忠金, 闫全人, 闫臻, 等. 2010. 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*, 26(4): 1 116 ~ 1 132.
- 徐学义, 黄月华, 夏林圻, 等. 1996. 岚皋金云角闪辉石岩类捕虏体特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 15(3): 193 ~ 202.
- 徐学义, 黄月华, 夏林圻, 等. 1997. 岚皋金云角闪辉石岩类捕虏体: 地幔交代作用的证据[J]. *岩石学报*, 13(1): 1 ~ 13.
- 徐学义, 夏林圻, 夏祖春, 等. 2001. 岚皋早古生代碱质煌斑杂岩地球化学特征及成因探讨[J]. *地球学报*, 22(1): 55 ~ 61.
- 张成立, 高山, 袁洪林, 等. 2007. 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)*, 37(7): 857 ~ 865.
- 张成立, 高山, 张国伟, 等. 2002. 南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学及其意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 32(10): 819 ~ 829.
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. *中国科学(D 辑)*, 26(3): 193 ~ 200.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1 ~ 885.
- 赵国春, 胡健民, 孟庆任. 2003. 武当地块西部席状基性侵入岩群地球化学特征: 南秦岭古生代底侵作用的依据[J]. *岩石学报*, 19(4): 612 ~ 622.
- 邹先武, 段其发, 汤朝阳, 等. 2011. 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*, 38(2): 282 ~ 291.