

# 南秦岭东部新元古代埃达克质岩的发现及其地质意义

蔡文春<sup>1)</sup>, 曾忠诚<sup>1,2)</sup>, 赵鹏彬<sup>1,2,3)</sup>, 杨宗永<sup>4)</sup>, 李景晨<sup>1)</sup>, 王明志<sup>1)</sup>, 朱雪丽<sup>1,3)</sup>, 张小明<sup>1)</sup>

1) 陕西省矿产地质调查中心, 西安, 710068; 2) 陕西省地质调查院, 西安, 710054;

3) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083; 4) 中国科学院地球化学研究所, 贵阳, 550081

**内容提要:**秦岭造山带是一条复合型大陆碰撞造山带, 存在若干新元古代构造岩浆事件的遗迹, 它们对深化认识南北秦岭汇聚-碰撞过程和 Rodinia 超大陆聚合具有重要意义。本文对南秦岭东部豆腐尖岩体英云闪长岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和全岩主微量元素地球化学研究。代表性样品的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 860.7 ± 6.0 Ma, 表明其形成时代为新元古代。岩石地球化学特征表现为高 SiO<sub>2</sub> (62.41% ~ 68.89%)、高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15.33% ~ 17.33%), 富 Na<sub>2</sub>O (4.23% ~ 5.80%) 和高 Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 比值 (1.11 ~ 2.41), 富 Sr (> 400 × 10<sup>-6</sup>), 低 MgO (0.55% ~ 2.08%), 低 Y (7.40 × 10<sup>-6</sup> ~ 18.20 × 10<sup>-6</sup>), Yb (0.63 × 10<sup>-6</sup> ~ 1.62 × 10<sup>-6</sup>), 高 Sr/Y 比值 (31.49 ~ 78.22), 轻稀土元素显著富集 [(La/Yb)<sub>N</sub> > 20], 弱 Eu 正异常, 具埃达克质岩特征。较高的 K<sub>2</sub>O 含量 (2.00% ~ 4.31%) 和低 MgO 以及显著的高 La/Yb 比值等特征指示, 其具有典型高钾钙碱性埃达克质岩特征, 很可能源于加厚下地壳的部分熔融, 推测该岩体形成时南秦岭地壳厚度可能达到 65 km。结合区域地质资料, 认为豆腐尖岩体形成于陆-陆碰撞环境, 是新元古代松树沟洋盆闭合后北秦岭和南秦岭碰撞造山的产物, 是 Rodinia 超大陆聚合事件在该地区的岩浆响应。新元古代早期南商豆腐尖高钾钙碱性埃达克质岩的首次识别为限定南-北秦岭碰撞事件提供了有力约束。

**关键词:**埃达克质岩; U-Pb 年代学; 新元古代; 松树沟洋; 碰撞造山; 南秦岭

Kay 于 1978 年在研究北美阿留申 Adak 岛的火山岩时, 提出其中的高镁英安岩和安山岩可能是由俯冲的太平洋板片发生板片熔融 (slab melting) 形成的。1990 年 Defant 和 Drummond 在《Nature》上将产生在俯冲消减环境由板片熔融形成的一套具有 SiO<sub>2</sub> ≥ 56%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 15%、亏损重稀土元素 (HREE) 与 Y (如 Yb 为 1.9 × 10<sup>-6</sup>, Y 为 18 × 10<sup>-6</sup>)、高 Sr (> 400 × 10<sup>-6</sup>, 很少小于 400 × 10<sup>-6</sup>)、La/Yb (> 7.6 ~ 15.0) 与 Sr/Y (> 20.0 ~ 40.0)、一般具有正铈异常 (少数具有极弱负铈异常) 的中酸性火成岩称为埃达克岩。2000 年至今, 我国发现了大量埃达克质岩石, 学者们对其进行了岩石地球化学、成因模型、实验岩石学和成矿作用等方面的研究和评述; 埃达克质岩石的研究对探讨弧下岩浆过程、壳幔相互作用、大陆地壳的生长与演化以及一些造山

带的古造山演化等具有重要的科学意义 (Pei Xianzhi et al., 2003)。

秦岭中央山系是一条复合型大陆碰撞造山带, 保留较完整的显生宙造山的地质记录, 但仍然存在若干新元古代构造热事件的遗迹 (Zhang Zongqing et al., 1997), 这些古老的造山地质记录对于研究古板块的汇聚历史与 Rodinia 超大陆聚合裂解都具有重要意义。前人对秦岭造山带新元古代地质事件的系统研究, 揭示了众多新元古代汇聚裂解的重大构造岩浆事件, 与早期洋壳俯冲、陆块汇聚有关的岩浆事件集中在商丹断裂带北侧的北秦岭构造带 (Pei Xianzhi et al., 2003; Li Zhensheng et al., 2020) 和勉略构造带内 (Zhang Zongqing et al., 2005; Yan Quanren et al., 2007; Xu Tong et al., 2016), 而超大陆聚合后大规模裂解的地质记录则集中于南秦

注: 本文为陕西省公益性地质调查项目 (编号 20170103、20150103、20170102) 和陕西省地质勘查基金项目 (编号 61201908335) 联合资助成果。

收稿日期: 2020-06-25; 改回日期: 2020-12-16; 网络发表日期: 2020-12-21; 责任编辑: 吴才来; 责任编辑: 周健。

作者简介: 蔡文春, 男, 1987 生。工程师, 主要从事基础地质调查与矿产勘查及相关研究。Email: geo\_cai@163.com。

引用本文: 蔡文春, 曾忠诚, 赵鹏彬, 杨宗永, 李景晨, 王明志, 朱雪丽, 张小明. 2021. 南秦岭东部新元古代埃达克质岩的发现及其地质意义. 地质学报, 95(3): 686~702, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021117.

Cai Wenchun, Zeng Zhongcheng, Zhao Pengbin, Yang Zongyong, Li Jingchen, Wang Mingzhi, Zhu Xueli, Zhang Xiaoming. 2021. The discovery of Neoproterozoic adakitic rocks in the east of South Qinling and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 95(3): 686~702.

岭。本文以商丹断裂带南侧南秦岭东部新厘定的与新元古代陆块汇聚有关的埃达克质岩为研究对象,对其进行了锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学、锆石微量元素等研究,探讨南秦岭东部豆腐尖岩体的岩石成因及形成机制,揭示其形成的深部动力学过程,为探讨秦岭造山带新元古代造山演化及 Rodinia 超大陆聚合过程提供新的有力证据。

### 1 地质背景与岩体特征

秦岭造山带位于中国大陆中央造山带(系)中段,是一条多期次复合型造山带(Su Wen et al., 2013)。前人从板块构造角度(Mattauer et al., 1985; Zhang Guowei et al., 1996; Wu Yuanbao et al., 2013; Dong Yunpeng et al., 2011)和大地构造

相角度对该造山带构造单元进行了较为全面的划分(Wang Zongqi et al., 2009),大多数研究者认同秦岭造山带主体由 2 个主缝合带(商丹和勉略缝合带)和 3 个块体(北秦岭及华北克拉通南缘、扬子克拉通北缘及二者间的秦岭地块)组成(图 1a)。通常将商丹断裂带以北的造山带部分称为北秦岭,主要分布有古元古代秦岭岩群、中元古代(?)宽坪岩群和新元古代至早古生代的丹凤岩群和二郎坪岩群;断裂带以南称为南秦岭,主要分布有古元古代陡岭岩群、中元古代武当岩群和新元古代耀岭河群及震旦纪地层(图 1b)。新元古代时期随松树沟洋盆封闭,北秦岭和南秦岭汇聚碰撞(Chen Zhihong, 2004),形成了较为强烈的构造变形和岩浆事件(Kröner et al., 1993; Wang Tao et al., 2005; Wang Xiaoxia et al.,

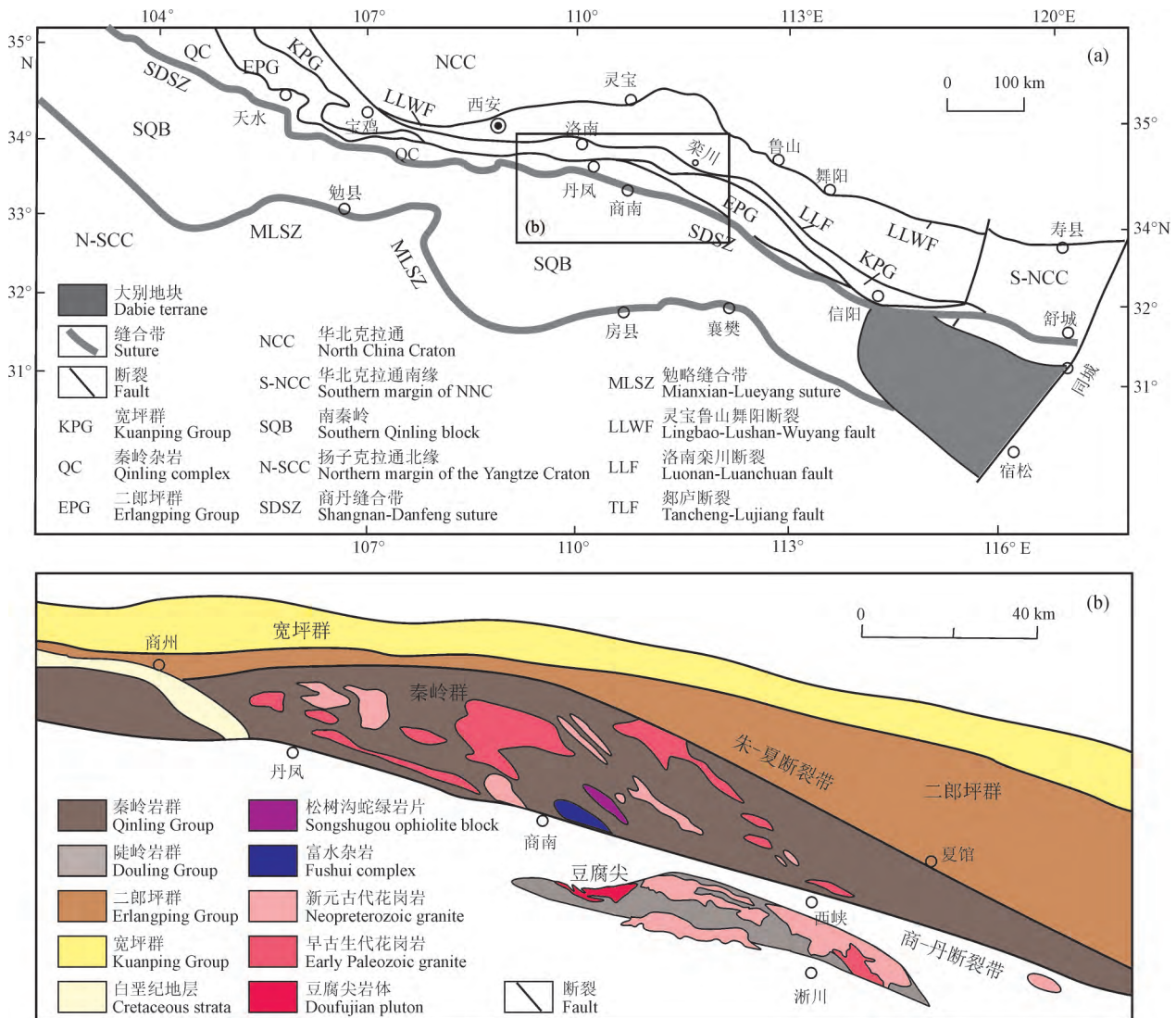


图 1 秦岭造山带构造格架(a,据 Wang Xiaoxia et al., 2013 修改)和东秦岭地质简图(b,据 Chen Zhihong, 2004 修改)  
 Fig 1 Tectonic of the Qinling orogen (a, modified from Wang Xiaoxia et al., 2013) and simplified geological map of the eastern Qinling orogen (b, modified from Chen Zhihong, 2004)

2013)。豆腐尖岩体位于陕西省东南部商南县豆腐尖一带,构造位置属秦岭造山带商丹断裂带以南的南秦岭构造带(图 1b),出露面积约 19km<sup>2</sup>,地表形态为一西部具掌指状分叉的条带状岩株,主要由英云闪长岩组成。岩体与耀岭河岩组呈构造面理接触,遭受了区域变质变形作用,发育不同程度的片理化,延长方向与围岩走向基本一致,均为 NWW-SEE。

英云闪长岩呈灰白色,岩石具中细粒花岗结构、糜棱岩化结构,块状构造,主要矿物成分有斜长石(50%~65%)、石英(25%~35%)、角闪石(5%~10%)等(图 2),副矿物包括锆石、磷灰石、榍石、磁铁矿等。斜长石由更长石组成,呈半自形晶,粒径 1.45~4.75mm;石英呈他形粒状,粒径 0.02~1mm;角闪石呈黄绿色、灰绿色、蓝绿色等,半自形柱状,粒径 0.15~1.20mm;磁铁矿粒径 0.03~

0.35mm,半自形晶。岩石中的斜长石和镁铁质矿物遭受不同程度蚀变,主要为斜长石绢云母化,黑云母和角闪石的绿泥石化。

## 2 分析方法

锆石挑选在西安瑞石科技有限公司完成,阴极发光图像分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室 Gatan MonoCL3+X 型阴极荧光谱仪上完成。在双目镜下挑选晶型完整、未破碎,具有代表性的锆石颗粒,并将其整齐粘贴于无色透明的环氧树脂表面制成样品靶,并对锆石样靶品进行打磨抛光,使锆石的中心部位暴露,表面平整、光洁,测试前用浓度 3%的稀 HNO<sub>3</sub> 清洗表面,去除表面污染物。之后对锆石进行显微照相(反射光、透射光)和阴极发光(CL)图像分析,选择代表性的锆石颗粒,避开包裹体和裂隙区域进行 U-Pb 测年。

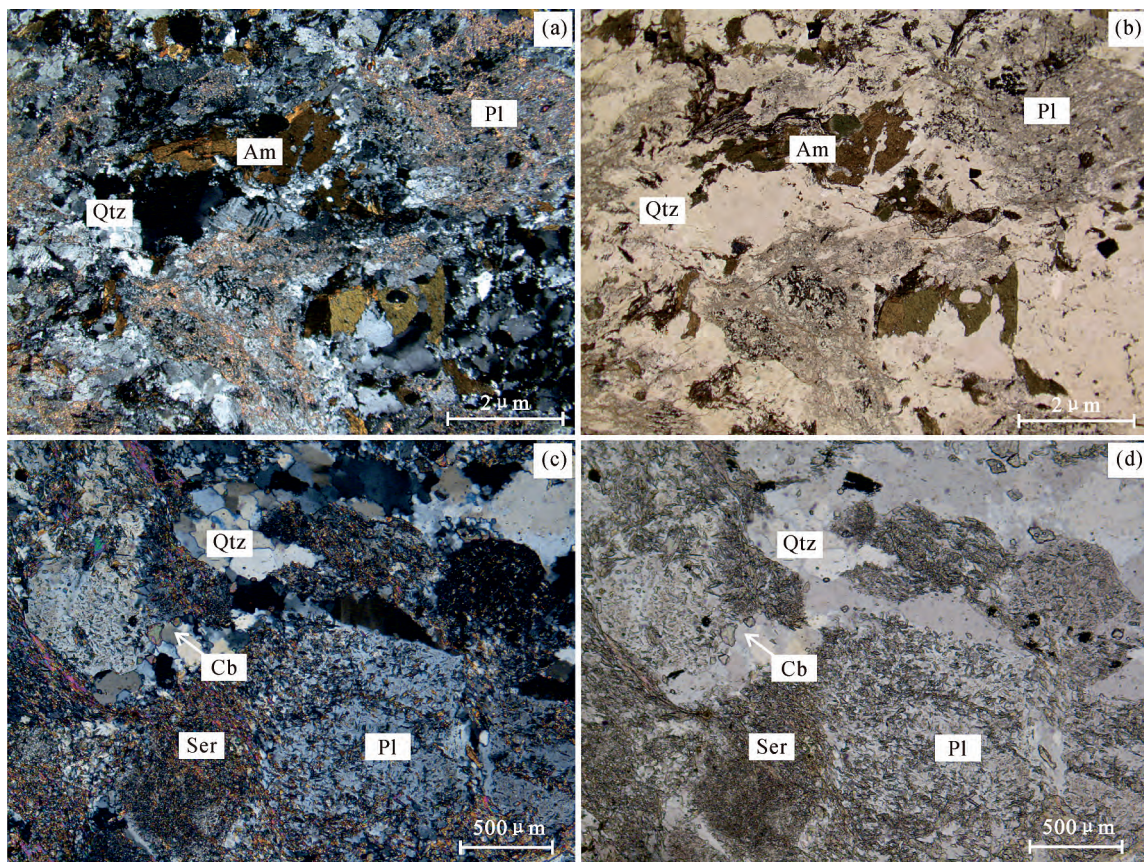


图 2 商南豆腐尖英云闪长岩典型岩相学特征

Fig 2 Microphotograph of the Doufujian tonalites in Shangnan, southern Qingling

(a)、(b)—英云闪长岩主要造岩矿物组成和中细粒结构特征;(c)、(d)—岩石中的斜长石绢云母化蚀变和碳酸盐岩蚀变矿物;(a)和(c)为单偏光,(b)和(d)为正交偏光;Qtz(Q)—石英;Am—角闪石;Pl—斜长石;Ser—绢云母;Cb—碳酸盐矿物

(a) and (b)—The major mineral phases and fine-grained texture feature of the Doufujian tonalites; (c) and (d)—sericitization and carbonatization of plagioclase; (a) and (c) are plane-polarized, (b) and (d) are cross-polarized images; Qtz (Q)—quartz; Am—hornblende; Pl—plagioclase; Ser—sericite; Cb—carbonate mineral

锆石微量元素和 U-Pb 同位素定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。所用 ICP-MS 为 Agilent7500a, 激光剥蚀系统为 GeoLas200M, 激光剥蚀斑束直径为 32 $\mu$ m, 激光剥蚀深度为 20~40 $\mu$ m。实验载气为 He, 测试过程中用 NIST SRM610 进行仪器最佳化。采样方式为单点剥蚀, 数据采集采用一个质量峰一点的跳峰方式, 每完成 10 个待测样品测定, 插入标样一次, 锆石年龄采用标准锆石 GJ-1 作为外部标准物质, 元素含量采用外 SRM610 作为外标。选择<sup>29</sup>Si 作为内标消除激光能量在点分析过程中以及分析点之间的漂移。分析数据采用 ICPMSDateCal(Liu et al., 2008)进行离线处理, 普通铅校正采用 ComPbCorrection(Andersen, 2002)软件, 年龄计算及谐和图采用 Isoplot3(Ludwig, 2003)软件完成。

主量元素和微量元素测试均在核工业二〇三研究所分析测试中心完成。主量元素采用荷兰帕纳科制造的 AxiosX 射线光谱仪进行分析, 元素分析误

差 <1%; 微量元素和稀土元素采用美国 Thermo Fisher 制造 XSERIES<sup>II</sup> 型 ICP-MS 进行分析, 分析精度优于 5%。

### 3 分析结果

#### 3.1 锆石 U-Pb 年龄

英云闪长岩样品(Dy $\delta$ -2)中的锆石较多, 呈浅黄色、豆沙色、浅玫瑰色, 粒径主要为 0.08~0.15mm, 延长系数 1.5~2.5 为主, 晶型为柱状、次棱角柱状, 个别呈长柱状。阴极发光(CL)图像显示锆石具有明显的振荡环带(图 3)。选取 25 颗锆石于振荡环带发育部位进行测试, 获得的同位素比值及年龄结果见表 1 和图 4, 谐和度主要为 97%~99%, 锆石 Th/U 比值较大, 在 0.45~1.87 之间, 平均为 1.06, 结合阴极发光(CL)图像, 说明为岩浆成因锆石(Wu Yuanbao et al., 2004)。锆石测年结果较集中, 都位于谐和线上(图 4), 获得<sup>206</sup>U/<sup>238</sup>Pb 加权平均年龄为 860.7 $\pm$ 6.0 Ma( $n=24$ ; MSWD=1.9), 指示商南豆腐尖岩体形成时代为新元古代早期。

表 1 南秦岭豆腐尖英云闪长岩锆石 LA-ICP-MS 分析数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytical results of the Doufujian tonalites in Shangnan, southern Qinling

测点	( $\times 10^{-6}$ )		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)						谐和度
	U	Th		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 $\sigma$	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 $\sigma$	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1 $\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 $\sigma$	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 $\sigma$	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1 $\sigma$	
1	147.13	182.92	1.62	1.35062	0.03730	0.143651	0.00173	0.04152	0.00176	867.83	16.12	865.27	9.77	822.38	34.31	99
2	119.02	142.77	1.57	1.35229	0.04095	0.143545	0.00203	0.04162	0.00178	868.55	17.68	864.68	11.47	824.23	34.59	99
3	202.03	98.71	0.64	1.39292	0.04313	0.147803	0.00335	0.04769	0.00218	885.94	18.31	888.64	18.87	941.81	42.06	99
4	275.24	187.63	0.88	1.27530	0.02881	0.140733	0.00145	0.04268	0.00167	834.76	12.86	848.81	8.22	844.86	32.40	98
5	221.81	75.85	0.45	1.29953	0.02820	0.140079	0.00206	0.04119	0.00173	845.52	12.45	845.11	11.65	815.95	33.65	99
6	241.02	337.76	1.79	1.34151	0.03135	0.140312	0.00139	0.04093	0.00153	863.88	13.60	846.43	7.87	810.83	29.86	97
7	192.99	150.81	1.02	1.29533	0.03236	0.139871	0.00174	0.04129	0.00154	843.66	14.32	843.93	9.86	817.92	30.02	99
8	185.65	158.17	1.11	1.32918	0.03444	0.140064	0.00194	0.04183	0.00167	858.52	15.02	845.02	10.97	828.29	32.49	98
9	74.37	57.63	1.03	1.27496	0.04573	0.138375	0.00203	0.03957	0.00176	834.61	20.41	835.46	11.53	784.47	34.28	99
10	295.44	147.69	0.66	1.35341	0.03685	0.143267	0.00149	0.04572	0.00189	869.03	15.90	863.11	8.41	903.66	36.66	99
11	212.19	116.13	0.73	1.37346	0.03949	0.147727	0.00206	0.04334	0.00190	877.65	16.90	888.21	11.58	857.67	36.94	98
12	180.72	107.73	0.77	1.24282	0.03067	0.139561	0.00214	0.04069	0.00191	820.16	13.89	842.18	12.13	806.28	37.21	97
13	225.94	197.44	1.13	1.33521	0.03017	0.146425	0.00187	0.04363	0.00208	861.15	13.12	880.89	10.53	863.32	40.37	97
14	79.48	57.75	0.92	1.75530	0.05938	0.161013	0.00239	0.05777	0.00284	1029.12	21.89	962.41	13.28	1135.33	54.43	93
15	189.07	138.44	0.97	1.31376	0.03667	0.140632	0.00191	0.04592	0.00213	851.78	16.09	848.24	10.80	907.57	41.30	99
16	335.67	467.65	1.87	1.49171	0.05732	0.144790	0.00175	0.04579	0.00199	927.02	23.36	871.69	9.86	904.97	38.57	93
17	231.30	114.68	0.66	1.43535	0.03071	0.146019	0.00144	0.04894	0.00210	903.79	12.81	878.61	8.13	965.79	40.64	97
18	185.69	179.96	1.23	1.37746	0.04166	0.146280	0.00185	0.04280	0.00178	879.35	17.80	880.08	10.45	847.19	34.58	99
19	288.70	203.25	0.95	1.36529	0.02702	0.144793	0.00173	0.04275	0.00181	874.14	11.60	871.71	9.73	846.13	35.09	99
20	259.45	242.47	1.19	1.32728	0.03250	0.142095	0.00171	0.04273	0.00184	857.70	14.18	856.50	9.67	845.91	35.85	99
21	252.84	248.23	1.19	1.31053	0.02892	0.142688	0.00164	0.04429	0.00212	850.36	12.71	859.85	9.26	876.13	41.13	98
22	194.92	142.42	0.95	1.34547	0.03782	0.143847	0.00215	0.04474	0.00222	865.60	16.38	866.38	12.15	884.79	43.08	99
23	209.45	125.16	0.80	1.31761	0.04166	0.142128	0.00195	0.04498	0.00263	853.47	18.25	856.69	11.03	889.40	50.95	99
24	187.85	184.50	1.29	1.35276	0.03195	0.144253	0.00198	0.04293	0.00229	868.75	13.79	868.67	11.18	849.63	44.54	99
25	172.89	122.98	0.96	1.30218	0.03229	0.142564	0.00200	0.04329	0.00250	846.68	14.24	859.14	11.33	856.75	48.46	98

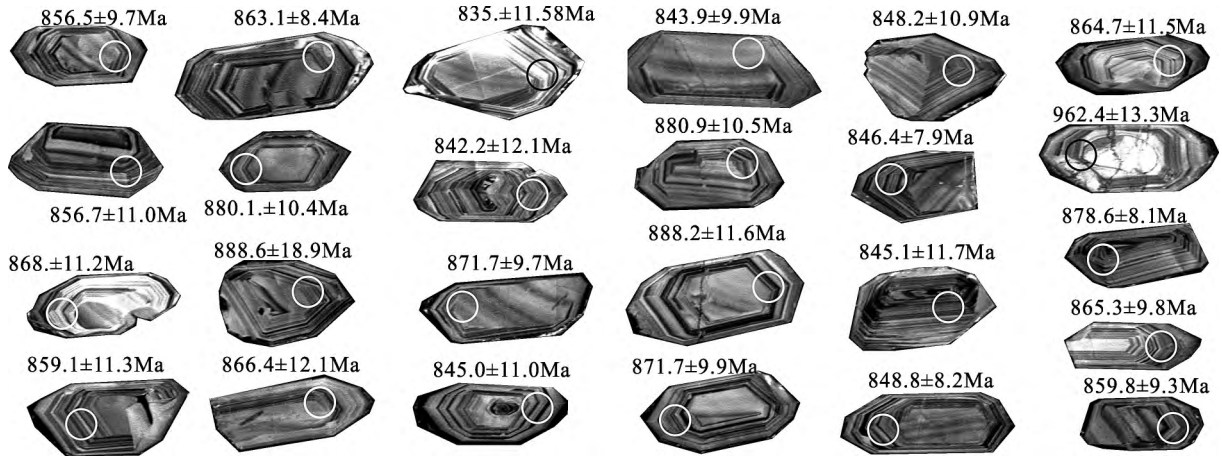


图3 豆腐尖英云闪长岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircon from Doufujian tonalites in Shangnan, southern South Qingling

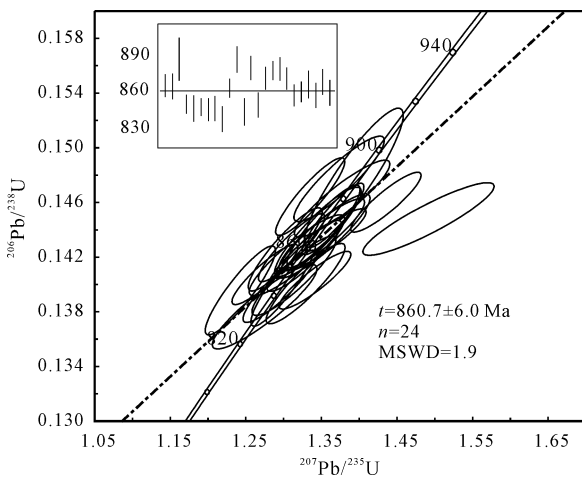


图4 豆腐尖岩体花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram for the Doufujian tonalite in Shangnan, southern Qingling

### 3.2 岩石地球化学特征

豆腐尖英云闪长岩样品主量元素分析结果见表2,文中涉及的主量元素含量、比值及特征参数均为扣除烧失量后100%归一化的值。岩石SiO<sub>2</sub>含量较高(62.41%~68.89%),平均为65.72%;富Na<sub>2</sub>O(4.23%~5.80%,平均为4.76%),K<sub>2</sub>O(2.00%~4.31%,平均为3.27%)相对Na<sub>2</sub>O稍低,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O比值均大于1,平均为1.53,(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)为6.82%~9.16%,平均为8.03%,在岩石化学分类图上(图5a)主要落入石英二长岩和花岗闪长岩区域;具有高钾钙碱性特征(图5b)。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量较高(15.33%~17.33%),均大于15%,平均为16.01%;铝饱和指数(A/CNK)值0.91~1.23,平均为1.02。MgO含量较低(0.55%~2.08%),平均为1.27%;Mg<sup>#</sup>值31.21~48.59,平均38.96。

豆腐尖英云闪长岩样品稀土元素分析结果见表3。该岩体的稀土总量偏低,为 $76.35 \times 10^{-6} \sim 269.42 \times 10^{-6}$ ;轻稀土元素相对重稀土元素富集,其(La/Yb)<sub>N</sub>为16.12~52.57;多数样品具有不同程度Eu正异常特征,δEu值主要集中于1.05~1.62,仅一个样品为0.88。稀土配分曲线(图6a)显示向右倾斜、轻稀土分馏明显、重稀土分馏不明显及铈正异常的特征。

豆腐尖英云闪长岩样品Sr含量高,为 $422 \times 10^{-6} \sim 904 \times 10^{-6}$ ,平均 $666.71 \times 10^{-6}$ ;Y含量低,为 $7.40 \times 10^{-6} \sim 18.20 \times 10^{-6}$ ,平均 $12.02 \times 10^{-6}$ ;Yb含量较低,为 $0.63 \times 10^{-6} \sim 1.62 \times 10^{-6}$ ,平均 $0.98 \times 10^{-6}$ (表3)。原始地幔标准化的微量元素蜘蛛图(图6b)上,它们富集大离子亲石元素(LILEs,如Th,U),而亏损高场强元素(HFSEs,如Nb,Ti等),并具有弱的Sr、Eu正异常。

### 3.3 锆石微量元素

豆腐尖英云闪长岩锆石微量元素原位分析结果见表4,稀土总量较高,为 $300.46 \times 10^{-6} \sim 947.96 \times 10^{-6}$ ,平均 $536.33 \times 10^{-6}$ ;除Ce之外,轻稀土元素相对重稀土元素明显亏损;显示弱到中等程度Eu亏损,δEu值为0.25~0.66,平均0.54;具有明显的Ce正异常,δCe值为7.20~267.68,平均99.20。球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图7)显示轻稀土亏损、重稀土极度富集,从La到Lu含量依次升高,具显著的Ce的正异常,较强的Eu负异常,这与典型的岩浆锆石稀土元素特征基本一致(Belousova et al., 2002; Hoskin et al., 2003)。同时具有较高的U/Yb比值和较低的Hf、Y含量;Hf含量 $7756 \times 10^{-6} \sim 11516 \times 10^{-6}$ ,平均 $9290.44 \times$

表 2 南秦岭豆腐尖岩体英云闪长岩主要微量(%)分析结果

Table 2 Major elements contents (%) of the Doufujian tonalites in Shangnan, southern Qinling

样品号	5923-1*	5925-2*	2405-12*	2405-21*	2202-1*	D3700	Dγδ-1	Dγδ-2	Dγδ-3	Sγδ-1	Sγδ-2
SiO <sub>2</sub>	66.62	67.09	62.41	65.5	67.10	67.49	64.03	65.62	64.37	63.81	68.89
TiO <sub>2</sub>	0.57	0.51	0.55	0.50	0.05	0.55	0.62	0.56	0.68	0.60	0.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.39	15.60	15.78	16.31	16.32	16.00	15.33	15.51	15.48	17.07	17.33
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.24	1.81	1.18	3.02	3.05	2.25	2.83	3.06	3.21	3.42	1.84
FeO	1.36	1.64	2.87	0.92	0.56	1.29	0.81	0.56	0.81	1.47	0.51
MnO	0.032	0.058	0.06	0.05	0.02	0.03	0.05	0.06	0.06	0.12	0.09
MgO	1.26	1.11	2.08	1.43	0.88	0.98	1.29	1.28	1.51	1.64	0.55
CaO	2.10	3.40	3.66	2.85	1.22	0.39	3.01	2.27	2.01	4.11	1.68
Na <sub>2</sub> O	5.06	4.36	4.82	4.82	4.23	5.29	4.48	4.44	4.77	4.26	5.80
K <sub>2</sub> O	2.85	3.00	2.00	2.50	3.82	3.87	3.69	3.69	4.31	3.23	3.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.16	0.10	0.10	0.10	0.15	0.23	0.20	0.24	0.27	0.07
LOI	1.88	0.51	3.99	1.61	1.92	1.66	3.37	2.39	2.20	2.16	1.69
Total	99.54	99.25	99.50	99.61	99.27	99.95	99.74	99.64	99.65	99.61	99.68
A/CNK	1.01	0.94	0.94	1.03	1.23	1.18	0.91	1.01	0.96	0.95	1.09
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1.78	1.45	2.41	1.93	1.11	1.37	1.21	1.20	1.11	1.32	1.92
σ	2.65	2.25	2.40	2.38	2.69	3.43	3.17	2.92	3.86	2.70	3.00
Mg <sup>#</sup>	40.01	37.76	48.59	41.26	32.24	34.57	40.71	40.83	42.18	39.19	31.21

注: Mg<sup>#</sup> = 100 × Mg / (Mg + Fe) (原子数); LOI 为烧失量; 编号带 “\*” 的样品数据引自《狮子坪、商南、徐家店、白浪、南化塘幅 1 : 5 万区调联测报告》。

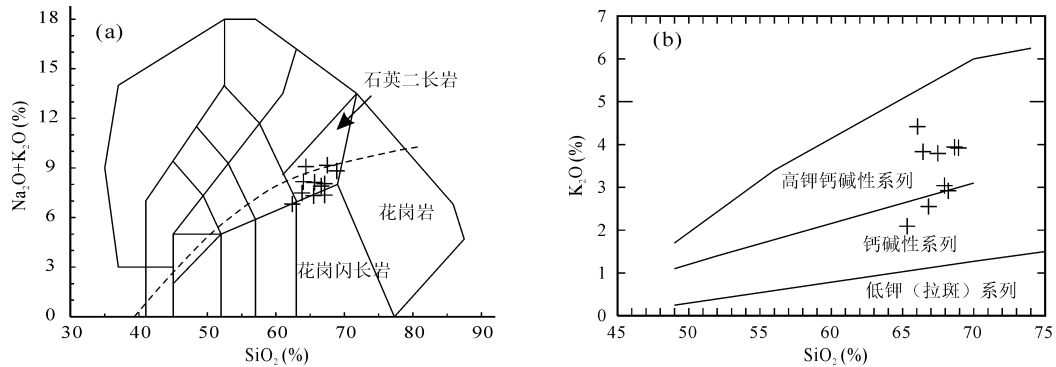


图 5 豆腐尖英云闪长岩 TAS 图(a, 据 Le Base et al., 1986)和 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图(b, 据 Peccerillo et al., 1976)

Fig. 5 TAS (a, after Le Base et al., 1986) and K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> (b, after Peccerillo et al., 1976) diagrams for the Doufujian tonalities

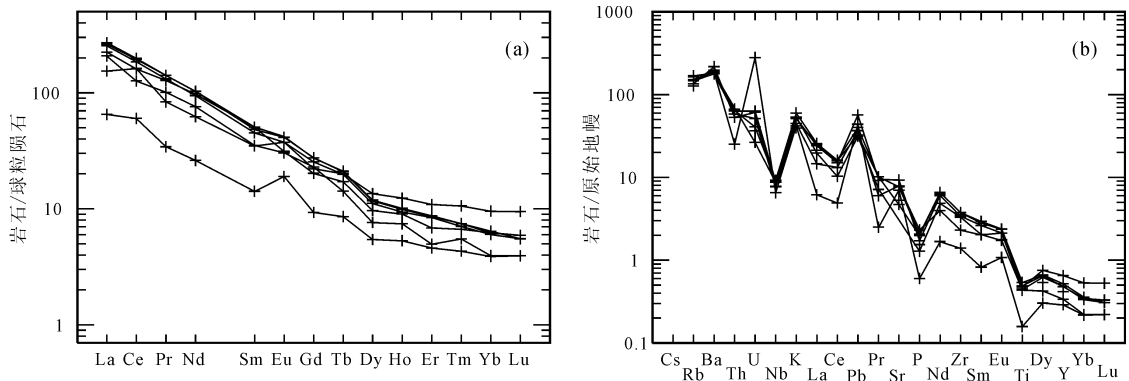


图 6 豆腐尖岩体英云闪长岩稀土元素球粒陨石标准化(a)及微量元素原始地幔标准化配分型式(b) (标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element patterns of Doufujian tonalites (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

表3 南秦岭豆腐尖岩体英云闪长岩微量元素( $\times 10^{-6}$ )分析结果Table 3 Trace element contents ( $\times 10^{-6}$ ) of the Doufujian tonalites in Shangnan, southern Qinling

样品号	5923-1*	2405-21*	5925-2*	D3700	Dy $\delta$ -1	Dy $\delta$ -2	Dy $\delta$ -3	Sy $\delta$ -1	Sy $\delta$ -2
La	53	26.43	/	49.1	62.1	60.1	64.0	36.4	15.4
Ce	97.92	59.43	/	77.2	119	113	121	99	36.7
Pr	12.1	6.04	/	9.58	13.4	12.5	13.4	7.92	3.25
Nd	45.5	22.29	/	35.4	47.9	44.0	48.0	29.0	12.2
Sm	7.72	4.92	/	5.37	7.38	6.90	7.73	5.32	2.16
Eu	1.81	1.73	/	1.76	2.40	2.17	2.43	2.17	1.10
Gd	4.15	2.86	/	4.70	5.66	5.22	5.62	4.55	1.91
Tb	0.64	0.41	/	0.53	0.78	0.74	0.79	0.75	0.32
Dy	2.45	1.92	/	1.93	2.97	2.82	3.02	3.43	1.38
Ho	0.51	0.36	/	0.42	0.56	0.53	0.57	0.70	0.30
Er	1.13	0.91	/	0.82	1.42	1.39	1.44	1.80	0.76
Tm	0.17	0.114	/	0.14	0.19	0.18	0.19	0.27	0.11
Yb	1.06	0.63	/	0.67	1.05	1.02	1.09	1.62	0.66
Lu	0.15	0.074	/	0.10	0.15	0.14	0.14	0.24	0.10
Y	11.6	7.4	/	9.44	13.4	13.5	14.5	18.2	8.08
$\Sigma$ REE	228.31	128.12	/	187.72	264.96	250.71	269.42	193.17	76.35
(La/Yb) <sub>N</sub>	35.86	30.09	/	52.57	42.42	42.26	42.12	16.12	16.74
$\delta$ Eu	0.88	1.29	/	1.05	1.09	1.06	1.08	1.31	1.62
Cr	66	/	18	8.8	7.7	9.0	7.9	11.0	7.4
Rb	71	/	59	94.1	83.5	82.1	84.9	75.2	91.5
Sr	475	/	904	/	422	835	690	709	632
Ba	1155	/	1342	1146.59	1233.9	1119.55	1182.68	1363	1176
Nb	197	/	108	20.3	20.7	18.1	21.5	17.9	15.2
Ta	0.95	/	0.82	0.87	1.15	1.08	1.18	1.71	1.70
Zr	262	/	217	245	278	252	278	170	103
Hf	6	/	6	1.50	3.05	2.29	2.19	2.07	2.36
Th	8	/	8	/	7.59	6.99	7.68	6.36	3.03
Sc	7.5	/	7.8	4.2	5.5	6.4	3.9	6.3	4.1
Ni	10	/	5	7.67	9.02	8.50	8.88	11.30	7.06
U	1.71	/	1.51	1.24	2.97	2.41	1.91	2.86	13.10
Pb	/	/	/	9.4	9.7	17.0	12.0	11.0	13.1
Ga	22.0	/	22.0	24.2	25.6	24.7	24.4	20.6	20.0
Te	/	/	/	0.049	0.018	0.017	0.014	0.043	0.015
Li	/	/	/	15.7	24.7	19.3	17.9	16.0	13.9
Be	/	/	/	2.78	3.01	3.25	2.85	1.84	2.08
Co	6.00	/	7.00	5.89	4.04	5.12	6.70	8.64	2.93
Zr/Hf	43.67	/	36.17	163.33	91.15	110.04	126.94	81.98	43.60
Sr/Y	40.95	/	/	/	31.49	61.85	47.59	38.95	78.22
Th/U	4.68	/	5.3	/	2.56	2.90	4.02	2.22	0.23

注:编号带“\*”的样品数据引自《狮子坪、商南、徐家店、白浪、南化塘幅1:5万区调联测报告》;“/”表示测试过程中未检测该元素。

$10^{-6}$ ; Y 含量  $355 \times 10^{-6} \sim 1228 \times 10^{-6}$ , 平均  $659.92 \times 10^{-6}$ ; U/Yb 比值 0.24~1.51, 平均 0.92。

## 4 讨论

### 4.1 岩石类型与成因

#### 4.1.1 次生蚀变作用影响的评估

由于部分样品具有较高的烧失量,广泛出现的斜长石绢云母化、角闪石和黑云母的绿泥石化现象,表明商南豆腐尖岩体经历了不同程度的次生蚀变作用。因此,需要对次生蚀变作用对全岩化学成分的影响进行判断。

MgO 和  $K_2O$  与 LOI 值具有一定程度正相关性,表明它们可能发生不同程度的迁移,但影响可能不大。其他元素与 LOI 值之间不具有明显相关,表明蚀变作用对它们的影响有限。蚀变作用过程中,Zr 是不活动的典型元素。除了 Rb、U、Pb 等极端容易随流体迁移的元素之外,其他微量元素和 REE 与 Zr 之间具有良好的线性关系。这表明除上述三个元素之外,其他绝大多数微量元素没有因蚀变作用发生显著变化,可以用于岩石成因判断。

表 4 南秦岭豆腐尖岩体英云闪长岩锆石微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 分析结果

Table 4 Zircon trace element contents ( $\times 10^{-6}$ ) of the Doufujian tonalites in Shangnan, southern Qinling

测点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Hf	Nb	$\Sigma$ REE	LREE/HREE	$\delta$ Eu	$\delta$ Ce
1	0.06	52.51	0.19	3.57	6.49	3.12	33.34	9.97	109.64	39.11	161.92	35.81	335.47	56.80	1152	7756	4.90	848	0.08	0.53	76.16
2	0.11	43.01	0.17	2.86	5.56	2.70	25.43	7.59	86.02	31.32	128.79	28.74	270.60	46.53	926	7758	4.08	679	0.09	0.58	62.37
3	0.00	16.61	0.05	0.62	1.06	0.69	6.85	2.25	26.30	10.20	50.43	12.33	144.05	29.02	355	10516	1.49	300	0.07	0.59	103.13
4	0.01	20.70	0.02	0.68	1.51	0.74	7.84	2.60	31.11	13.34	61.37	16.55	181.70	37.81	461	10171	1.83	376	0.07	0.53	267.68
5	0.09	12.99	0.05	0.49	1.16	0.67	6.41	2.35	29.43	12.99	65.96	18.17	210.82	45.40	450	9625	1.18	407	0.04	0.60	46.85
6	2.47	76.94	0.57	4.92	7.94	2.84	33.09	9.13	93.50	31.79	132.88	28.98	287.16	53.15	1000	8787	4.23	765	0.14	0.46	15.31
7	0.06	33.10	0.08	0.99	2.72	1.35	14.23	4.25	47.64	18.75	84.90	20.51	221.80	43.59	612	9082	2.62	494	0.08	0.53	98.76
8	0.04	24.29	0.04	0.59	1.48	0.81	7.67	2.48	31.09	13.06	62.55	15.99	179.86	36.42	444	10013	1.92	376	0.08	0.59	134.58
9	0.03	27.06	0.09	1.67	3.61	1.60	15.77	5.04	55.09	20.62	86.76	19.72	190.39	31.88	622	8171	2.80	459	0.08	0.55	82.34
10	0.06	23.87	0.05	0.71	1.82	0.91	10.40	3.64	48.89	20.74	100.57	26.16	296.11	63.88	672	9327	2.37	598	0.05	0.50	100.08
11	0.02	20.61	0.02	0.45	1.14	0.91	8.85	2.70	34.97	15.81	80.14	21.45	255.84	52.88	551	8594	1.92	496	0.05	0.62	228.38
12	0.11	21.18	0.09	0.78	1.98	1.06	9.23	3.19	35.93	14.10	65.98	15.81	175.30	34.28	458	9855	1.74	379	0.07	0.63	49.04
13	0.01	27.71	0.06	0.87	1.84	0.82	10.32	2.95	33.88	12.44	60.36	14.24	162.52	31.76	414	9669	1.86	360	0.10	0.45	134.40
14	0.03	17.22	0.22	3.04	6.64	1.50	32.88	10.89	124.36	43.57	182.64	38.38	338.11	53.76	1202	8169	11.01	853	0.03	0.25	23.04
15	0.00	24.81	0.05	0.71	1.71	0.97	10.43	3.18	38.41	15.30	76.48	19.06	215.92	43.58	529	9677	1.83	451	0.07	0.54	154.05
16	0.00	55.59	0.12	2.02	4.48	2.53	23.19	6.29	68.28	23.49	106.65	24.85	262.61	50.77	796	9419	2.89	631	0.11	0.61	143.82
17	1.28	17.46	0.24	1.18	1.46	0.92	7.97	2.68	31.77	13.71	68.64	18.39	208.34	44.49	445	9903	0.98	419	0.06	0.66	7.20
18	0.01	25.82	0.05	1.07	2.64	1.34	13.20	3.64	43.02	15.58	71.26	17.57	188.53	38.56	505	9601	1.93	422	0.08	0.57	148.42
19	0.19	27.50	0.25	1.52	2.20	1.16	10.93	3.71	45.06	18.09	90.47	22.90	250.43	51.25	607	9402	1.94	526	0.07	0.59	26.18
20	0.13	38.39	0.10	1.78	4.77	2.00	20.17	6.30	66.16	24.46	105.05	25.27	258.88	50.18	727	9635	3.01	604	0.08	0.53	78.35
21	0.29	41.12	0.19	2.29	3.73	1.59	17.41	4.82	58.86	22.64	108.08	26.11	286.05	57.10	749	9368	2.69	630	0.08	0.50	41.69
22	0.04	25.97	0.06	0.91	1.80	0.93	9.96	3.18	38.26	15.60	78.70	19.71	217.35	44.14	525	9625	2.40	457	0.07	0.53	106.04
23	0.06	19.37	0.06	0.78	1.41	0.91	9.56	3.04	37.94	15.27	79.40	21.00	223.63	46.90	503	9675	1.45	459	0.05	0.56	71.55
24	0.02	55.59	0.15	2.98	6.92	3.47	36.50	11.41	127.55	44.08	187.05	40.61	370.62	61.01	1228	8580	7.06	948	0.08	0.54	109.22
25	0.00	27.58	0.05	1.00	2.93	1.59	15.75	4.59	50.11	18.58	83.37	19.79	204.47	41.15	565	9883	1.82	471	0.08	0.57	171.25

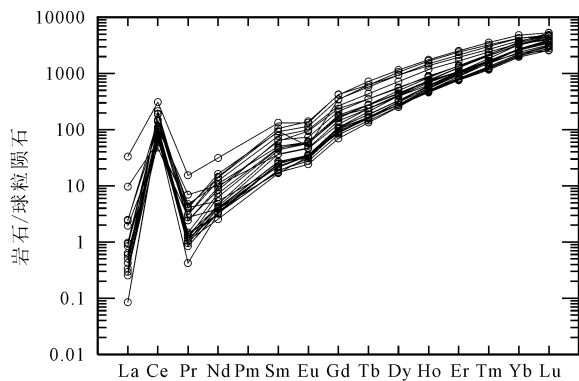


图 7 豆腐尖英云闪长岩锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图(标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns for zircons from Doufujian tonalites (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

4.1.2 岩石类型和成因

南秦岭东部豆腐尖岩体地球化学特征符合典型埃达克岩  $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ 、亏损重稀土元素(HREE)与 Y(如 Yb 为  $1.9 \times 10^{-6}$ , Y 为  $18 \times 10^{-6}$ )、高 Sr( $>400 \times 10^{-6}$ , 很少小于  $400 \times 10^{-6}$ )、La/Yb( $>7.6 \sim 15.0$ )与 Sr/Y( $>20.0 \sim 40.0$ )、一

般具有正铈异常(少数具有极弱负铈异常)的特征。在  $(\text{Yb})_N - (\text{La}/\text{Yb})_N$  图(图 8a)及 Y-Sr/Y 图(图 8b)上,豆腐尖岩体英云闪长岩样品均落入埃达克岩及邻近区域,而不同于典型的岛弧钙碱性中酸性火成岩,表明新元古代豆腐尖花岗岩体具有埃达克岩地球化学特征,为埃达克质岩石。

关于埃达克岩成因模式,目前主要有以下几种观点:① 俯冲板片熔融(Rapp et al., 1999; Carmichael, 2002; Macpherson et al., 2006);② 玄武质岩浆低压结晶分异和同化混染(Li Jianwei et al., 2009);③ 俯冲陆壳部分熔融(Wang Qiang et al., 2008);④ 拆沉下地壳部分熔融(Kay et al., 1993; Gao Shan et al., 2004);⑤ 加厚下地壳部分熔融(Atherton et al., 1993; Condie, 2005; He Yongsheng et al., 2011);⑥ 岩浆混合作用(Qin Jiangfeng et al., 2010)。

俯冲板片熔融形成的熔体在上升穿过地幔楔过程中混染地幔岩形成的埃达克岩常具有富钠低钾( $\text{Na}_2\text{O}$  平均  $4.88\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比值  $2.5 \sim 6.5$ )、以及相对较高的 MgO 含量、 $\text{Mg}^\#$  和相容元素(Cr、Ni)含量的特征(Sajona et al., 2000; Rapp et al.,



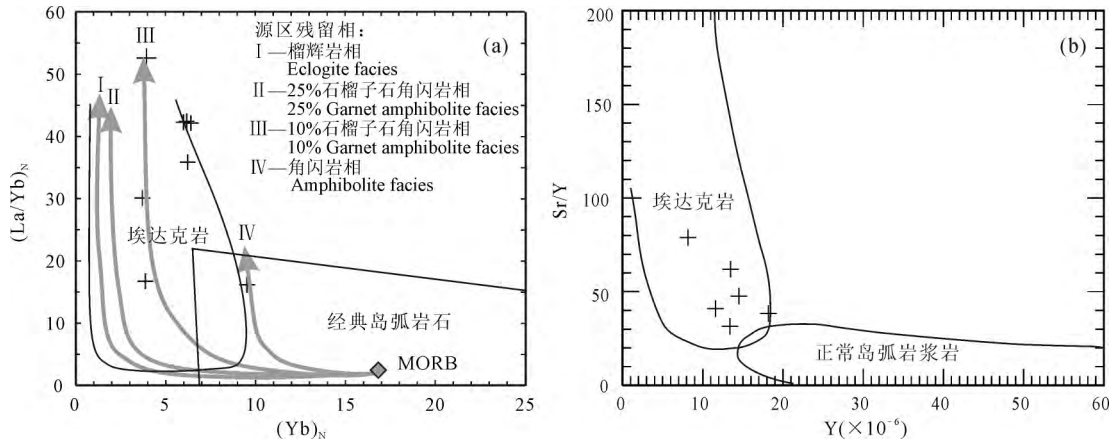


图8 豆腐尖英云闪长岩  $(Yb)_N-(La/Yb)_N$  图(a)与 Y-Sr/Y 图(b)(据 Drummond et al., 1990)  
 Fig. 8  $(Yb)_N-(La/Yb)_N$  (a) and Y-Sr/Y (b) diagrams for the Doufujian tonalites (after Drummond et al., 1990)

(a) 中带箭头曲线代表以洋中脊玄武岩为初始熔体物对应不同残余矿物相时熔体成分变化

Partial melt curves of MORB sources leaving either eclogite (I and III) or (garnet-) amphibolite (II and IV) restite

1999; Wood et al., 2009)。豆腐尖英云闪长岩具有较低的 MgO 含量(0.55%~2.08%),低  $Mg^\#$  值(平均 38.96),较低的 Cr( $7.40 \times 10^{-6} \sim 66 \times 10^{-6}$ )和 Ni( $5.00 \times 10^{-6} \sim 11.3 \times 10^{-6}$ )含量;  $Na_2O$  值与俯冲板片相当,但  $K_2O$  含量较高,  $Na_2O/K_2O$  比值明显较低(1.11~2.4, 平均为 1.53)。锆石微量元素特征可以识别锆石及其母岩的岩石类型、成因(Zhao Zhidan et al., 2018),反映岩浆组成及演化过程(Lei Weiyan et al., 2013; Wang Junpeng et al., 2019)。豆腐尖英云闪长岩中锆石具有较高的 U/Yb 比值和较低的 Hf、Y 含量,在 U/Yb-Hf 图解(图 9a)和 U/Yb-Y 图解(图 9b)中均落入了大陆锆石范围,指示锆石岩浆可能来源于大陆壳(Grimes et al., 2007)。上述这些特征指示豆腐尖埃达克质岩石与由俯冲板片熔融并与地幔楔相互作用形成的埃达克岩差异较大。

玄武质岩浆分离结晶常出现从玄武质岩石到长

英质岩石的组合,它们具有较大的  $SiO_2$  变化范围(Macpherson et al., 2006; Li Jianwei et al., 2009)。但豆腐尖岩体明显缺乏镁铁质岩石端元,且其  $SiO_2$  含量(62.41%~68.89%)变化范围较小,不具上述特征。在 La-La/Yb 图解(图 10a)、 $SiO_2-Zr/Sm$  图解(图 10b)、La-La/Sm 图解(图 10c)和  $SiO_2-Nb/La$  图解(图 10d)中,豆腐尖英云闪长岩样品的变化趋势与玄武质岩浆的分离结晶及同化混染过程存在差异,显示出了部分熔融的趋势。高压角闪石分离结晶常导致  $Dy/Yb$  与  $La/Yb$  的负相关特征,这与豆腐尖岩体相左,该岩体弱的 Eu 异常特征也不支持显著的斜长石分离结晶作用(He Yongsheng et al., 2011)。上述特征表明豆腐尖埃达克质岩石也不可能来源于玄武质岩浆的分离结晶与同化混染。

俯冲陆壳部分熔融形成的埃达克岩明显富钾( $K_2O > Na_2O$ ),具有较高的 Th 含量,高的 Rb/Ba、

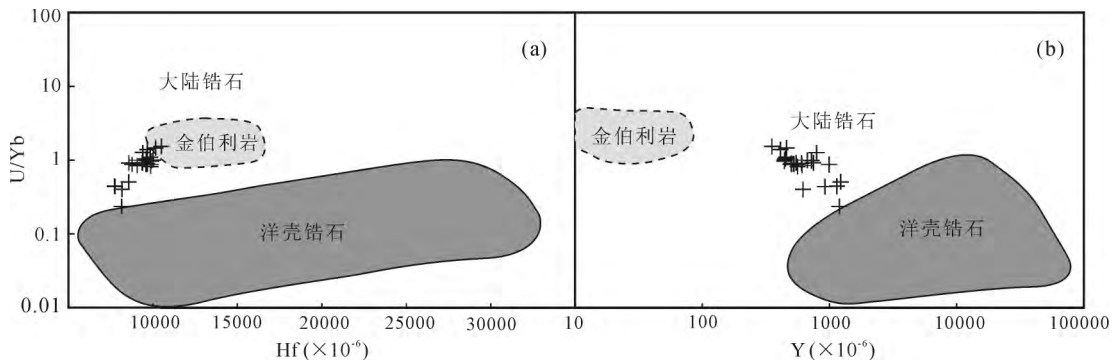


图9 豆腐尖英云闪长岩锆石 Hf-U/Yb 图(a)和 Y-U/Yb 图(b)(据 Grimes et al., 2007)  
 Fig. 9 Hf-U/Yb (a) and Y-U/Yb (b) diagrams for zircons from Doufujian tonalites (after Grimes et al., 2007)

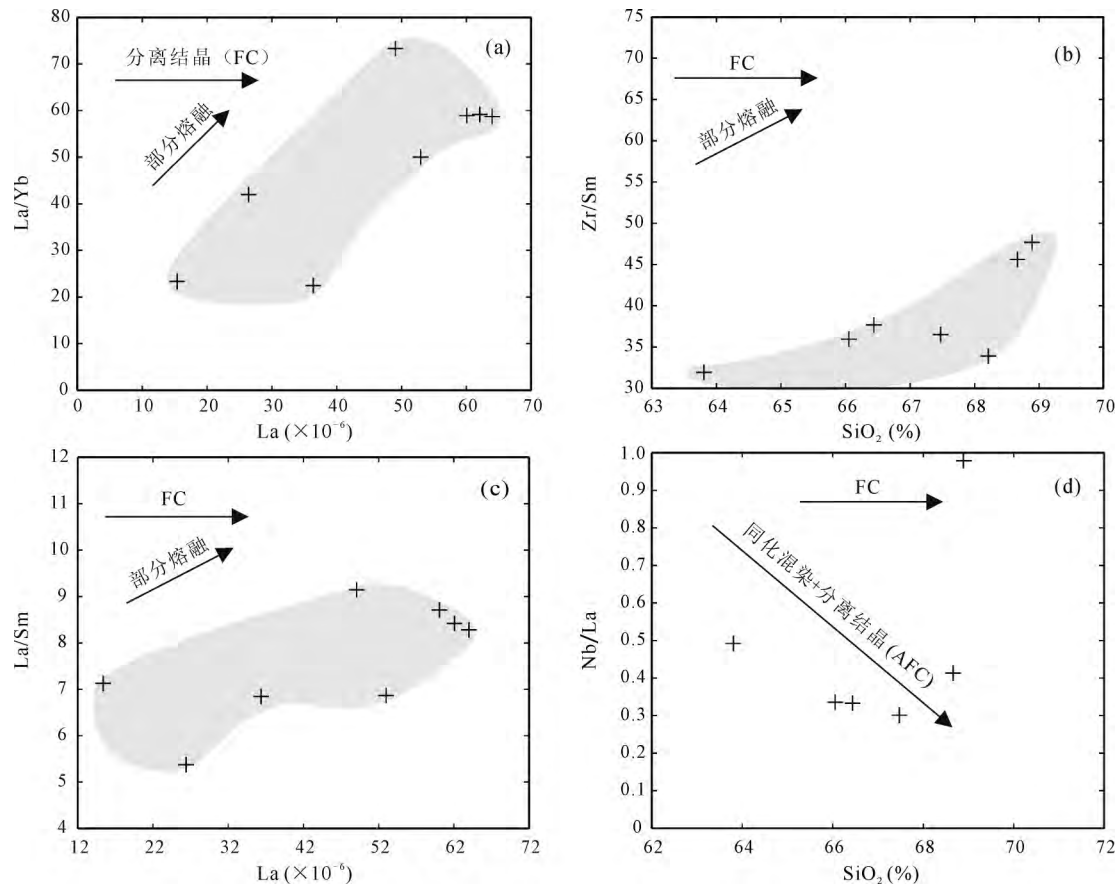


图 10 豆腐尖英云闪长岩 La-Yb (a)、SiO<sub>2</sub>-Zr/Sm (b)、La-La/Sm (c) 和 SiO<sub>2</sub>-Nb/La (d) 图解 (图中分离结晶 (FC)、同化混染-分离结晶 (FAC) 和部分熔融趋势据 Wang Yuejun et al., 2013; Tan Qingli et al., 2019)

Fig. 10 Plots of La vs. Yb-La (a), SiO<sub>2</sub> vs. Zr/Sm (b), La vs. La/Sm (c) and SiO<sub>2</sub> vs. Nb/La (d) for the Doufujian tonalities (FC, FAC and partial melting trends according to Wang Yuejun et al., 2013; Tan Qingli et al., 2019)

Th/U 和 Th/Ba 比值, 以及 Sr 的弱负异常 (Wang Qiang et al., 2008; Lai Shaocong et al., 2013)。豆腐尖埃达克质英云闪长岩明显富钠 ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ ), Th 含量 ( $3.03 \times 10^{-6} \sim 8.00 \times 10^{-6}$ ) 和 Rb/Ba (0.04~0.08)、Th/U (0.23~5.30) Th/Ba (均小于 0.01) 比值均较低, 而且具有较高的 Sr 含量 ( $422 \times 10^{-6} \sim 904 \times 10^{-6}$ ), 上述特征表明豆腐尖埃达克质岩石并非俯冲大陆地壳发生部分熔融所形成。

拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克岩具有高 Mg (MgO,  $\text{Mg}^\# > 50$ )、富 Cr、富 Ni 的特征 (Gao Shan et al., 2004), 而豆腐尖埃达克质岩石具有较低的 MgO 含量 (平均 1.27%) 和 Cr (平均  $16.98 \times 10^{-6}$ )、Ni (平均  $8.43 \times 10^{-6}$ ) 含量,  $\text{Mg}^\#$  值均小于 50, 平均 38.96。此外, 拆沉作用常伴随大规模的岩浆活动, 但新元古代早期的岩浆在南秦岭非常有限。因此, 豆腐尖埃达克质岩石并非拆沉下地壳部分熔融形成。

岩浆混合最显著的特征是岩体中大量出现暗色

镁铁质包体, 以及代表岩浆淬火结构的针状磷灰石 (Qin Jiangfeng et al., 2010)。然而, 商南豆腐尖岩体在露头尺度和微观岩相特征上均未见上述指示岩浆混合作用的典型特征。此外, 商南乃至整个南秦岭未见有与豆腐尖岩体同期的镁铁质岩浆活动记录。故此认为, 该岩体不是岩浆混合作用形成。

综上, 豆腐尖埃达克质岩石最可能由加厚下地壳部分熔融形成, 证据如下: ① 通常认为由加厚下地壳部分熔融形成的埃达克岩形成于碰撞造山环境或后碰撞环境 (He Yongsheng et al., 2011); 新元古代中国各主要克拉通地块通过碰撞拼合带发生过一次全面的多块体复杂拼贴 (Guo Jinjing et al., 1999), 北秦岭和南秦岭之间存在一条新元古代松树沟洋盆封闭过程中北秦岭和南秦岭汇聚碰撞形成的造山带 (Chen Zhihong et al., 2003), 南秦岭结晶基底陡岭岩群经历了新元古代早期强烈的构造变形和角闪岩相变质作用 (Hu Juan et al., 2013), 也指示碰撞造山过程的存在; 该区具有加厚下地壳部分熔

融形成的埃达克岩的区域构造背景。② 豆腐尖埃达克质岩石  $K_2O$  含量较高 (2.00% ~ 4.31%),  $Na_2O/K_2O$  比值整体大于 1 (1.11 ~ 2.41, 平均 1.53), 属于高钾钙碱性系列, 具有“高钾钙碱性埃达克岩”、“大陆型”埃达克岩的特征。③ 具有高 Sr 低 Yb, 高 Sr/Y 比值, Eu 正异常的特征, 表明岩浆形成于较高压力下, 源区主要残留相矿物为石榴石和角闪石 (图 8a), 无或极少斜长石; 同时具有较低的 MgO 含量 (0.55% ~ 2.08%, 平均 1.27%),  $Mg^\#$  值 (31.21 ~ 48.59, 平均 38.96) 和 Cr ( $7.40 \times 10^{-6}$  ~  $66 \times 10^{-6}$ ), Ni ( $5.00 \times 10^{-6}$  ~  $11.3 \times 10^{-6}$ ) 含量, 与加厚下地壳部分熔融形成的埃达克质岩石特征相似 (Atherton et al., 1993; Rapp, 1997)。在  $SiO_2$ -MgO 图 (图 11a) 和  $SiO_2$ - $Mg^\#$  图 (图 11b) 中均落入增厚下地壳熔融形成的埃达克岩区域。④ 豆腐尖岩体英云闪长岩的 Rb/Sr 比值  $> 0.05$ , 与加厚的下地壳部分熔融形成埃达克岩相似 (Huo Tengfei et al., 2018); Nd/Th 值 (平均 5.52) 和 Nb/Ta 值 (平均 15.95) 低于幔源岩石 (Nd/Th  $> 15$ ; Nb/Ta  $\approx 22$ ), 更接近壳源岩石 (Nd/Th  $\approx 3$ ; Nb/Ta  $\approx 12$ , Bea et al., 2001)。

#### 4.1.3 南秦岭新元古代早期的地壳加厚

由于商南豆腐尖埃达克质岩是由陆壳形成的, 因此, 其特征性的高 Sr/Y 和  $(La/Yb)_N$  可能反映了加厚地壳特征。由于这种特征也可能是继承源岩的特征。然而, 在  $(Dy/Yb)_N$  和  $(Gd/Yb)_N$  与  $(La/Yb)_N$  图 (图 12a、图 12b) 中, 商南豆腐尖埃达克质岩具有明显高于区域基底的相应比值, 而与现代俯冲带弧埃达克岩不同, 更类似大别造山带埃达克质岩 (He Yongsheng et al., 2011)。故此认为, 该岩体的高 Sr/Y 和  $(La/Yb)_N$  反映了地壳物质高压熔融

的特征, 指示可能的地壳增厚事件。

全球中酸性弧岩浆岩的地球化学特征与地壳厚度存在显著相关性, 其 Sr/Y 比值能够指示地壳厚度 (Chapman et al., 2015)。商南豆腐尖埃达克质岩 (剔除一个异常高值 122 后) 的平均 Sr/Y 值为 49.8, 指示其源区熔融深度至少在 65km (图 12c)。研究发现, 中酸性岩浆锆石的 Eu 异常强度与地壳厚度也存在很好的正相关性 (Tang Ming et al., 2020)。该岩体分析的锆石具有中等 Eu 负异常, 其平均值为 0.54, 据此推测岩浆形成的深度约为 70km (图 12d)。以上估算表明, 商南豆腐尖英云闪长岩岩浆形成时地壳厚度可能不低于 65km。

#### 4.2 地质意义

前人通过系统的地质、地球化学和同位素年代学研究, 在北秦岭变质地体中厘定出新元古代 (1000 ~ 800Ma) 松树沟蛇绿岩 (Chen Zhihong et al., 2004; Zhang Hongfu et al., 2019; Yu Hong et al., 2016), 新元古代 (1000 ~ 973 Ma) 俯冲环境基性侵入岩 (Zhang Zongqing et al., 2006), 新元古代从 979 ~ 815Ma 由同碰撞向后碰撞及碰撞后演化、具 S-I-S(A) 型演化趋势的花岗岩 (Zhang Chengli et al., 2004; Wang Xiaoxia et al., 2013), 以及小于 900Ma 的变质作用 (Lu Songnian et al., 2003); 表明北秦岭经历了新元古代时期洋壳俯冲、陆块汇聚地质过程 (Lu Songnian et al., 2003; Chen Zhihong, 2004)。

本次在南秦岭东段识别的豆腐尖新元古代花岗岩, 具有埃达克岩地球化学特征, 属高钾钙碱性系列, 源于加厚下地壳的部分熔融; 在花岗岩构造环境判别图中, 主要落入大陆碰撞花岗岩类及大陆弧花岗岩类区域 (图 13), 在 R1-R2 图解中落于晚造山和

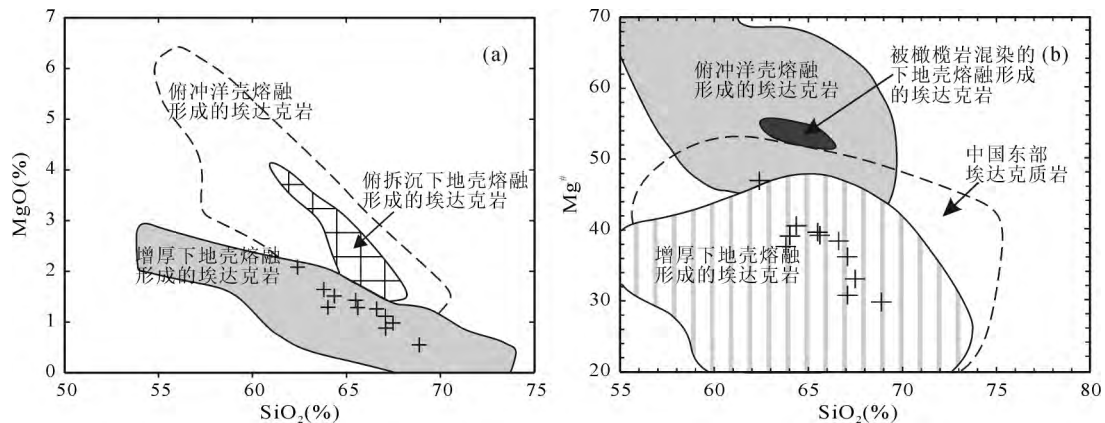


图 11 南秦岭东段豆腐尖英云闪长岩  $SiO_2$ -MgO 图 (a) 和  $SiO_2$ - $Mg^\#$  图 (b) (据 Li Ruihua et al., 2018)

Fig. 11  $SiO_2$ -MgO (a) and  $SiO_2$ - $Mg^\#$  (b) diagrams for the Doufujian tonalites (after Li Ruihua et al., 2018)

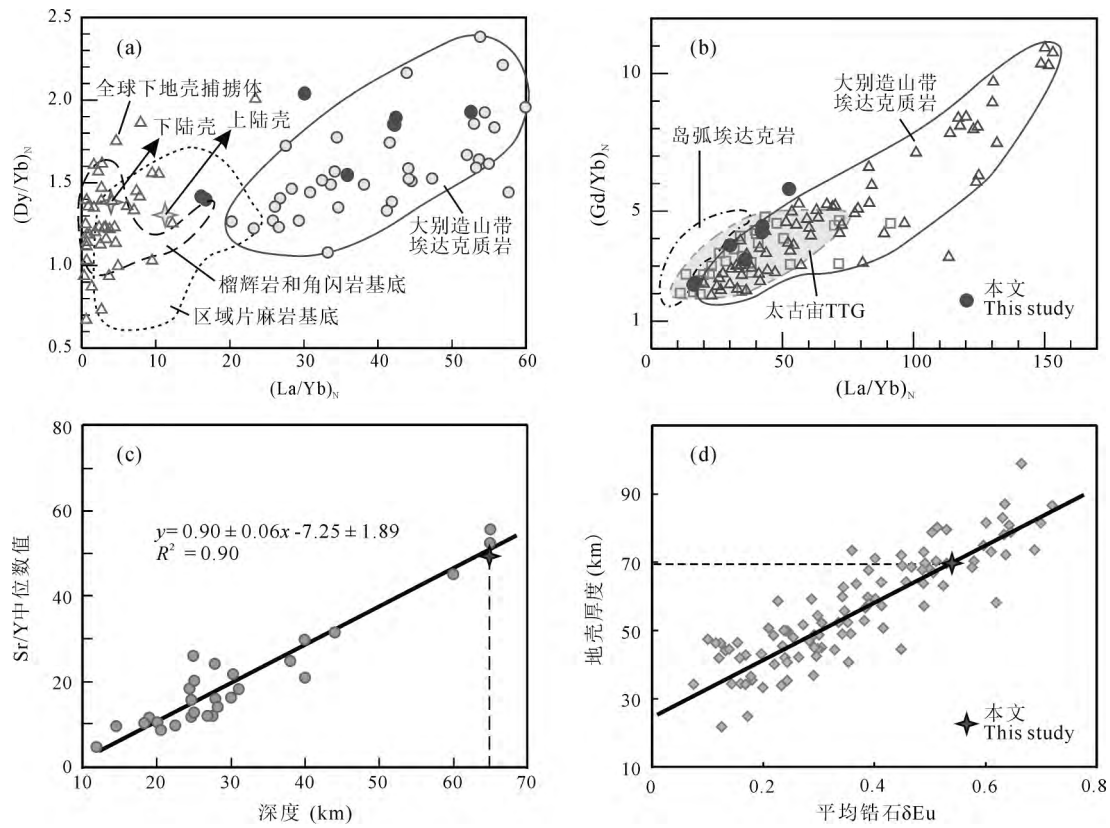


图 12 豆腐尖埃达克质岩成因判别与岩浆起源深度估算图

Fig. 12 Genetic discrimination diagram Plots illustrating the depth of magma source for the Doufujian adakitic rocks

(a)、(b)—全岩 $(Dy/Yb)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 与 $(La/Yb)_N$ 协变关系图(底图及参考物质据 He Yongsheng et al., 2011 及其中参考文献); (c)—中酸性岩浆岩的 Sr/Y 中位数值与岩浆起源深度关系(据 Chapman et al., 2015); (d)—锆石 Eu 异常与地壳厚度关系(据 Tang Ming et al., 2020)

(a), (b)—Variations of  $(Dy/Yb)_N$ ,  $(Gd/Yb)_N$  and  $(La/Yb)_N$  (after He Yongsheng et al., 2011 and references therein); (c)— global correlation plots of whole-rock median Sr/Y and geophysically determined crustal thickness (after Chapman et al., 2015); (d)—crustal thickness versus zircon Eu anomalies (after Tang Ming et al., 2020)

碰撞后隆升区域(图 14a),在 Ta-Yb 图解中落于岛弧火山岩与同碰撞火山岩边界区域(图 14b),上述岩石地球化学判别图解反映豆腐尖岩体的形成与陆陆碰撞造山作用密切相关。

豆腐尖埃达克质岩石的厘定,进一步说明北秦岭和南秦岭之间曾存在一条中—新元古代造山带,其源于加厚下地壳的部分熔融,是松树沟洋盆封闭过程中原同属扬子陆块的北秦岭和南秦岭汇聚碰撞的结果,此时南秦岭可能处于陆陆碰撞(地壳加厚)构造环境。精确的锆石 U-Pb 年龄,说明北秦岭和南秦岭汇聚碰撞时间和与 Rodinia 超大陆汇聚有关的扬子陆块与塔里木陆块、扬子陆块与澳大利亚大陆碰撞、聚合时间(1020 ~ 840Ma)相近(Lu Songnian et al., 2003),是对全球 Rodinia 超大陆汇聚的重要响应;秦岭地区 Rodinia 超大陆最终汇聚的时代不会晚于 860.7 ± 6.0Ma,但仍滞后于经典

格林威尔(1300~1000Ma)造山事件(Lu Songnian, 2001)。

### 5 结论

本文通过对豆腐尖岩体的年代学、元素地球化学及锆石微量元素的研究,结合其他地质资料,得到以下几点初步认识:

- (1)南秦岭东部豆腐尖岩体英云闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为 860.7 ± 6.0 Ma (MSWD=1.9, n=24),其形成时代为新元古代。
- (2)南秦岭东部豆腐尖岩体为埃达克质岩,岩浆源于加厚下地壳部分熔融。
- (3)豆腐尖岩体的形成与陆-陆碰撞造山作用密切相关,是新元古代松树沟洋盆封闭,北秦岭和南秦岭碰撞造山的产物,是 Rodinia 超大陆聚合事件在该地区的岩浆响应。

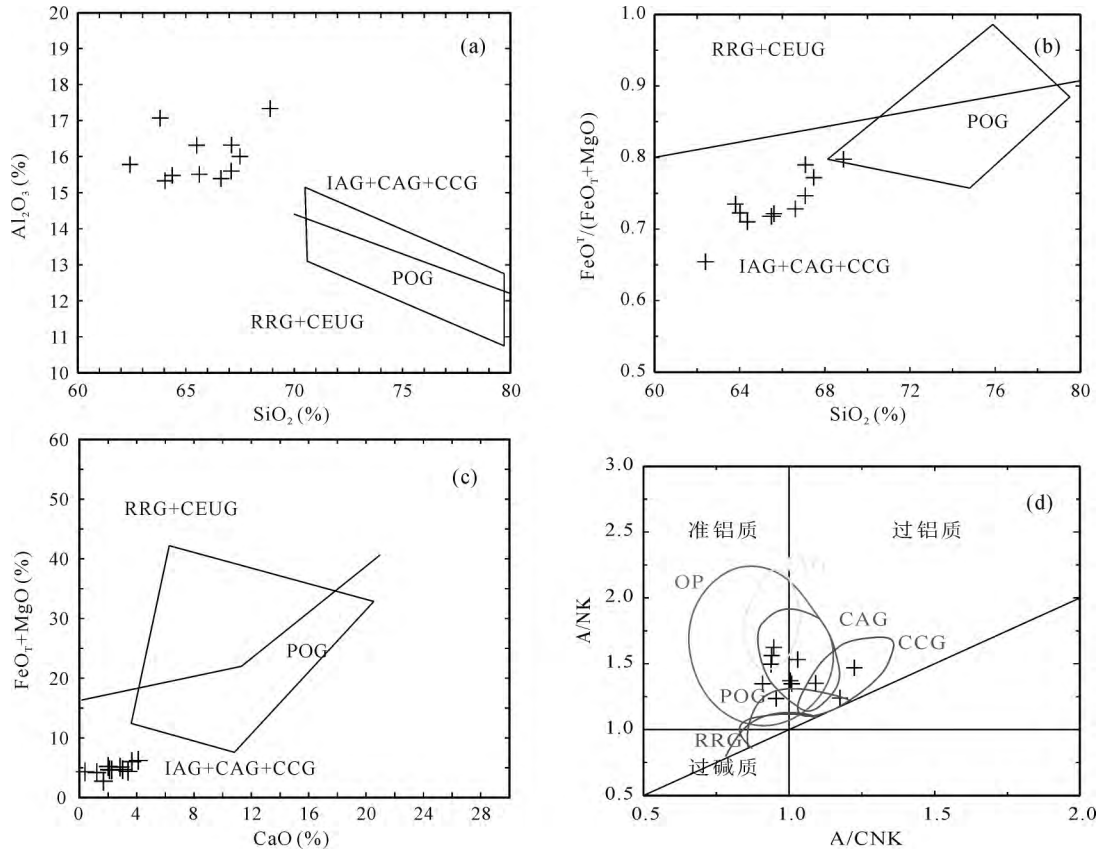


图 13 豆腐尖英云闪长岩构造环境判别图(底图据 Xiao Qinghui et al., 2002)

Fig. 13 Tectonic environment discrimination diagram for the Doufujian tonalites (after Xiao Qinghui et al., 2002)

IAG—岛弧花岗岩类; CAG—大陆弧花岗岩类; CCG—大陆碰撞花岗岩类; PGO—后造山花岗岩类; RRG—与裂谷有关的花岗岩类; CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类; OP—大洋斜长花岗岩类

IAG—Island arc granitoids; CAG—continental arc granitoids; CCG—continental collision granitoids; PGO—post orogenic granitoids; RRG—rift related granitoids; CEUG—continental continental uplift related granitoids; OP—oceanic plagiogranite

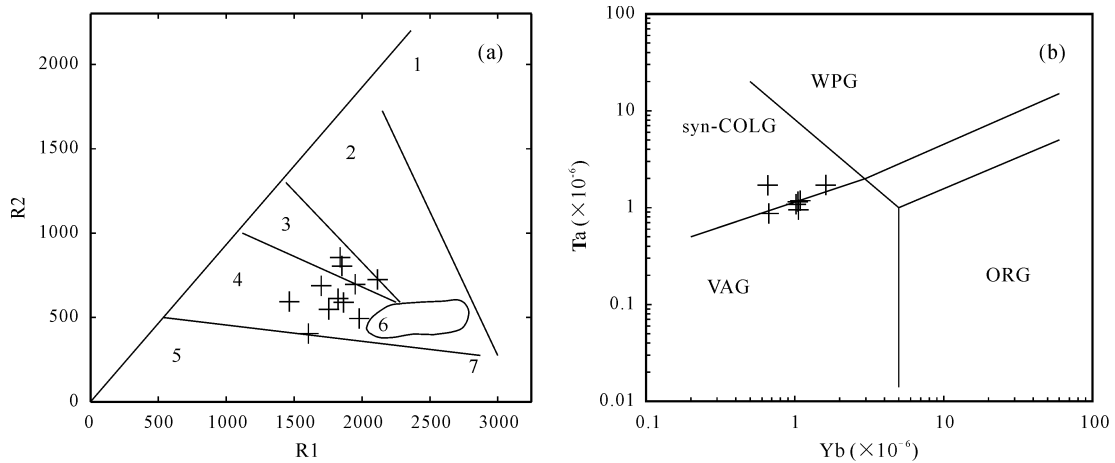


图 14 豆腐尖英云闪长岩 R2-R1(a, 底图据 Batchelor et al., 1985)和 Yb-Ta(b, 据 Pearce et al., 1984)构造环境判别图

Fig. 14 R2-R1 (a, after Batchelor et al., 1985) and Yb-Ta (b, after Pearce et al., 1984) diagram for the Doufujian tonalites

1—地幔分异环境; 2—板块碰撞前环境; 3—碰撞后隆升环境; 4—晚造山环境; 5—非造山环境; 6—同碰撞环境; 7—后造山环境; WPG—板内花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; syn-CLOG—同碰撞花岗岩

1—Mantle fractionation; 2—prior to plate collision; 3—uplift after collision; 4—late orogeny; 5—non-orogeny; 6—syn-collision; 7—post-collision; WPG—intraplate granite; ORG—ridge granite; VAG—volcanic arc granite; syn-CLOG—syn-collisional granite

## References

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59~79.
- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362(6416):144~146.
- Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 45(1): 43~55.
- Bea F, Arzamastsev A, Montero P, Arzamastseva L. 2001. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola; Evidence of mantle-derived metasomatic fluids affecting crustal materials. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(5):554~566.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon; trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5):602~622.
- Chapman J B, Ducea M N, DeCelles P G, Profeta L. 2015. Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera. *Geology*, 43(10): 919-922.
- Carmichael I S. 2002. The andesite aqueduct: Perspectives on the evolution of intermediate magmatism in west-central (105~99° W) Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(6):641~663.
- Chen Zhihong, Lu Songnian, Li Huaikun, Zhou Hongying, Xiang Zhenqun, Guo Jinjing. 2004. Age of the Fushui intermediate-mafic intrusive complex in the Qinling orogen: new zircon U-Pb and whole-rock Sm and Nd isotope chronological evidence. *Geological Bulletin of China*, 23(4):322~328 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhihong, Lu Songnian, Li Huaikun, Li Huimin. 2003. *Geology, Petrology and Geochemistry of Neoproterozoic granitoids of the Qinling Orogen, Central China, and its geological significance*. In "The role of Sri Lanka in Rodinia and Gondwana assembly and break-up" (Editor: Kehelpanala K V W), 62~64.
- Chen Zhihong. 2004. The Neoproterozoic tectono-thermal events in the eastern Qinling Orogen, and their geo-tectonic significances. PhD dissertation of Chinese Academy of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 2005. TTGs and adakites: Are they both slab melts? *Lithos*, 80(1-4):33~34.
- Dong Yunpeng, Liu Xiaoming, Zhang Guowei, Chen Qing, Zhang Xiaoning, Li Wei, Yang Chen. 2011. Triassic diorites and granitoids in the Foping area; Constraint on the conversion from subduction to collision in the Qinling orogen, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47(null): 123~142.
- Drummond M S, Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting; Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95(13): 21503~21521.
- Gao Shan, Rudnick R L, Yuan Hongling, Liu Xiaoming, Liu Yongsheng, Xu Wenliang, Ling Wenli, Ayers J, Wang Xuanche, Wang Qinghai. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892~897.
- Grimes C B, John B E, Kelen P B, Mazdab F K, Wooden J L, Cheadle M J, Hanghoj K, Schwartz J J. 2007. Trace element chemistry of zircon from oceanic crust; A method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology*, 35(7):643~646.
- Guo Jinjing, Zhang Guowei, Lu Songnian, Zhao Fengqing. 1999. Neoproterozoic continental block collage of China and Rodinia supercontinent. *Geological Journal of China Universities*, 5(2): 148~156 (in Chinese with English abstract).
- He Yongsheng, Li Shuguang, Hoefs J, Huang Fang, Liu Sheng-Ao, Hou Zhenhui. 2011. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen: New evidence for partial melting of a thickened continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(13): 3815~3838.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1):27~62.
- Hu Juan, Liu Xiaochun, Chen Longyao, Qu Wei, Li Huaikun, Geng Jianzhen. 2013. A ~2.5 Ga magmatic event at the northern margin of the Yangtze craton: Evidence from U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons from the Douling complex in the South Qinling orogen. *Chinese Science Bulletin*, 58(28~29): 3564~3579.
- Huo Tengfei, Yang Debin, Shi Jiangpeng, Yang Haotian, Xu Wenliang, Wang Feng, Lu Yi. 2018. Early Cretaceous Fengshan and Caishan high-Mg<sup>#</sup> adakitic rocks from the Xuzhou-Huaipei area, central China: Interaction between mantle peridotite and melt derived from partial melting of delaminated lower continental crust. *Acta Petrologica Sinica*, 34(6):1669~1684 (in Chinese with English abstract).
- Kay R W, Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219(1~3):177~189.
- Kay R W. 1978. Aleutian magnesian andesites; Melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1): 117~132.
- Kröner A, Zhang Guowei, Sun Yong. 1993. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China; Geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of eastern Asia. *Tectonics*, 12(1): 245~255.
- Lai Shaocong, Qin Jiangfeng. 2013. Adakitic rocks derived from the partial melting of subducted continental crust; evidence from the Eocene volcanic rocks in the northern Qiangtang block. *Gondwana Research*, 23(2):812~824.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, 27:745~750.
- Lei Weiyan, Shi Guanghai, Liu Yingxin. 2013. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 273~284 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianwei, Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Ma Changqian, de Souza Z S, Vasconcelos P. 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China; U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3):383~409.
- Li Ruihua, Zhang Han, Sun Fengyue, Wu Guang, Zhang Yuting, Wang Shuo. 2018. Geochronology and geochemistry of the Ershiyizhan intrusive rocks in the northern Great Hinggan Range, and its prospecting implications. *Acta Petrologica Sinica*, 34(6): 1725~1740 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhenheng, Jia Chao, Zhao Zhuoya, Huo Jinjing, Li Quanzhong, Zhang Jiaodong. 2020. Depositional age and provenance analysis of the Luanchuan Group in the southern margin of North China Craton and its significance for regional tectonic evolution; constraints from zircon U-Pb geochronology and Hf isotope. *Acta Geologica Sinica*, 94(4):1046~1066 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Li Huaikun, Chen Zhihong. 2003. Characteristics, sequence and ages of Neoproterozoic thermo-tectonic events between Tarim and Yangzi Blocks-A hypothesis of Yangzi-Tarim connection. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 321~326 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian. 2001. From Rodinia to Gondwanaland supercontinents-thinking about problems of researching Neoproterozoic supercontinents. *Earth Science Frontiers*, 8(4): 441~448 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center: Special Publication, 4: 1~70.

- Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3~4):581~593.
- Mattauer M, Matte Ph, Malavielle J, Tapponnier P, Maluski H, Xu Zhiqin, Lu Yilun, Tang Yaoqin. 1985. Tectonics of the Qinling belt: Build up and evolution of eastern Asia. *Nature*, 317(6037):496~500.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4):956~983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1):63~81.
- Pei Xianzhi, Wang Tao, Ding Sanping, Li Yong. 2003. Geochemical characteristics and geological significance of Neoproterozoic adakitic granitoids on the north side of the Shangdan zone in the East Qinling. *Geology in China*, 30(4):372~381 (in Chinese with English abstract).
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Diwu C-R, Ju Yinjuan Li Yongfei. 2010. Magma mixing origin for the post-collisional adakitic monzogranite of the Triassic Yangba pluton, Northwestern margin of the South China block: geochemistry, Sr-Nd isotopic, zircon U-Pb dating and Hf isotopic evidences. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159(3):389~409.
- Rapp P R. 1997. Heterogeneous source regions for Archean granitoids. In: de Wit M J, Ashwal L D eds. *Greenstone Belts*. Oxford: Oxford University Press, 35~37.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4):335~356.
- Sajona F G, Maury R C, Pubellier M, Leterrier J, Bellon H, Cotton J. 2000. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines). *Lithos*, 54(3-4):173~206.
- Su Wen, Liu Jingbo, Chen Nengsong, Guo Shun, Ba Jin, Zhang Lu, Liu Xin, Shi Yuxin. 2013. Geochronology and tectonic background of magmatic and metamorphic events in the East Qinling-Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5):1573~1593 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London: Special Publications*, 42(1):313~345.
- Tan Qingli, Wang Yuejun, Zhang Yuzhi, Yang Xue, Gou Qiyu, Zhou Yongzhi, Zhang Limin. 2019. The discovery of Neoproterozoic Chencai high-SiO<sub>2</sub> adakitic granodiorite in eastern Jiangnan Orogen and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 35(6):1907~1923 (in Chinese with English abstract).
- Tang Ming, Ji Weiqiang, Chu Xu, Wu Anbin, Chen Chen. 2020. Reconstructing crustal thickness evolution from europium anomalies in detrital zircons. *Geology*, 49.
- Wang Junpeng, Li Xiawen, Ning Wenbin, Kusky Timothy, Wang Lu, Polat Ali, Deng Hao. 2019. Geology of a Neoproterozoic suture: Evidence from the Zunhua ophiolitic mélange of the eastern Hebei Province, North China Craton. *GSA Bulletin*, 131(11-12):1943~1964.
- Wang Qiang, Wyman D A, Xu Jifeng, Dong Yanhui, Vasconcelos P M, Pearson N, Wan Yusheng, Dong Han, Li Chaofeng, Yu Yuanshan, Zhu Tongxing, Feng Xintao, Zhang Qiyue, Zi Feng, Chu Zhuyin. 2008. Eocene melting of subducting continental crust and early uplifting of central Tibet: Evidence from central western Qiangtang high-K calc-alkaline andesites, dacites and rhyolites. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(1-2):158~171.
- Wang Tao, Zhang Zongqing, Wang Xiaoxia, Wang Yanbin, Zhang Chengli. 2005. Neoproterozoic collisional deformation in the core of the Qinling orogen and its age: constrained by zircon SHRIMP dating of strongly deformed syn-collisional granites and weakly deformed granitic veins. *Acta Geologica Sinica*, 79(2):220~231 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Zhang Chengli. 2013. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72:129~151.
- Wang Yuejun, Zhang Aimei, Cawood P A, Fan W M, Xu Jifeng, Zhang Guowei, Zhang Yuzhi. 2013. Geochronological, geochemical and Nd-Hf-Os isotopic fingerprinting of an Early Neoproterozoic arc-back-arc system in South China and its accretionary assembly along the margin of Rodinia. *Precambrian Research*, 231:343~371.
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, Wang Tao, Jiang Chunfa, Gao Lianda, Li Qiugen, Chen Junlu, Zhang Yingli, Liu Ping, Xie Chunlin, Xiang Zhongjin. 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling orogenic belt, central China. *Acta Geologica Sinica*, 83(11):1527~1546 (in Chinese with English abstract).
- Wood B J, Turner S P. 2009. Origin of primitive high-Mg andesite: Constraints from natural examples and experiments. *Earth and Planetary Science Letters*, 283(1~4):59~66.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2013. Tectonic evolution of a continental collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Dabie orogenic belt in central China. *Gondwana Research*, 23(4):1402~1428.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15):1554~1569.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Dashuan, et al. 2002. *The Ways of Investigation on Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 21~30 (in Chinese without English abstract).
- Xu Tong, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, Chen Youxin, Li Baorui, Li Zuothen, Pei Lei. 2016. Geochemical features and zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of the Neoproterozoic Zhangergou metamorphic andesitic rocks in the Mianxian-Lüeyang area of South Qinling Orogen: Evidence for amalgamation of Rodinia supercontinent. *Geological Review*, 62(2):434~450 (in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Wang Zongqing, Yan Zhen, Xiang Zhongjin, Chen Junlu, Wang Tao. 2007. SHRIMP analyses for ophiolitic-mafic blocks in the Kangxian-Mianxian section of the Mianxian-Lüeyang melange: Their geological implications. *Geological Review*, 53(6):755~764 (in Chinese with English abstract).
- Yu Hong, Zhang Hongfu, Li Xianhua, Zhang Juan, Santosh M, Yang Yueheng, Zhou Dingwu. 2016. Tectonic evolution of the North Qinling Orogen from subduction to collision and exhumation: Evidence from zircons in metamorphic rocks of the Qinling Group. *Gondwana Research*, 30:65~78.
- Zhang Chengli, Liu Liang, Zhang Guowei, Wang Tao, Chen Danling, Yuan Honglin, Liu Xiaoming, Yan Yunxiang. 2004. Determination of Neoproterozoic post-collisional granites in the north Qinling Mountains and its tectonic significance. *Earth Science Frontiers*, 11(3):33~42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, Sun Yong, Zhou Dingwu, Guo Anlin. 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling orogen. *Science in China (Series D)*, 39(3):225~234.
- Zhang Hongfu, Yu Hong. 2019. Petrological and tectonic evolution of orogenic peridotite massif: A case of Songshugou peridotite. *Earth Science*, 44(4):1057~1066 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruiying, Sun Yong, Zhang Xu, Ao Wenhao, Santosh M. 2016. Neoproterozoic magmatic events in the South Qinling belt, China: Implications for amalgamation and breakup of the Rodinia supercontinent. *Gondwana Research*, 30:6~23.
- Zhang Zongqing, Tang Suohan, Song Biao, Zhang Guowei. 1997.

- Jinning strong geological events to take place in the Qingling orogenic belt and their tectonic setting. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(supp.):43~45 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Tang Suohan, Zhang Guowei, Yang Yongcheng, Wang Jinhui. 2005. Ages of metamorphic mafic-andesitic volcanic rock blocks and tectonic evolution complexity of Mianxian-Lueyang ophiolitic melange belt. *Acta Geologica Sinica*, 79(4):531~539 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Liu Dunyi, et al. 2006. Geochronology and Geochemistry of Ophiolite, Granite and Clastic Sedimentary Rocks in Qinling Orogenic Belt. Beijing: Geological Press, 9~55 (in Chinese).
- Zhao Zhidan, Liu Dong, Wang Qing, Zhu Dicheng, Dong Guochen, Zhou Su, Mo Xuanxue. 2018. Zircon trace elements and their use in probing deep processes. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 124~135 (in Chinese with English abstract).
- ### 参 考 文 献
- 陈志宏, 陆松年, 李怀坤, 周红英, 相振群, 郭进京. 2004. 秦岭造山带富水中基性侵入杂岩的成岩时代—锆石 U-Pb 及全岩 Sm、Nd 同位素年代学新证据. *地质通报*, 23(4): 322~328.
- 陈志宏. 2004. 秦岭造山带东部新元古代热-构造事件及其地质构造意义. 中国地质科学院博士学位论文.
- 郭进京, 张国伟, 陆松年, 赵凤清. 1999. 中国新元古代大陆拼合与 Rodinia 超大陆. *高校地质学报*, 5(2): 148~156.
- 霍腾飞, 杨德彬, 师江朋, 杨浩田, 许文良, 王枫, 卢毅. 2018. 徐淮地区早白垩世丰山和蔡山高镁埃达克质岩: 拆沉下地壳熔融的熔体与地幔橄榄岩的反应. *岩石学报*, 34(6): 1669~1684.
- 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 2013. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展. *地学前缘*, 20(4): 273~284.
- 李睿华, 张晗, 孙丰月, 武广, 张宇婷, 王硕. 2018. 大兴安岭北段二十一站岩体年代学、地球化学及其找矿意义. *岩石学报*, 34(6): 1725~1740.
- 李振生, 贾超, 赵卓娅, 霍金晶, 李全忠, 张交东. 2020. 华北克拉通南缘柴川群的形成时代? 物源及其对区域构造演化的意义: 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约. *地质学报*, 94(4): 1046~1066.
- 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 2003. 塔里木与扬子新元古代热-构造事件特征、序列和时代——扬子与塔里木连接(YZ-TAR)假设. *地学前缘*, 10(4): 321~326.
- 陆松年. 2001. 从罗迪尼亚到冈瓦纳超大陆——对新元古代超大陆研究几个问题的思考. *地学前缘*, 8(4): 441~448.
- 裴先治, 王涛, 丁仁平, 李勇, 胡波. 2003. 东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义. *中国地质*, 30(4): 372~381.
- 苏文, 刘景波, 陈能松, 郭顺, 巴金, 张璐, 刘新, 施雨新. 2013. 东秦岭-大别山及其两侧的岩浆和变质事件年代学及其形成的大地构造背景. *岩石学报*, 29(5): 1573~1593.
- 谭清立, 王岳军, 张玉芝, 杨雪, 苟琪钰, 周永智, 张立敏. 2019. 江南造山带东段陈蔡地区新元古代高硅埃达克质花岗闪长岩的发现及其构造启示. *岩石学报*, 35(6): 1907~1923.
- 王涛, 张宗清, 王晓霞, 王彦斌, 张成立. 2005. 秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代限定——强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石 SHRIMP 年龄证据. *地质学报*, 79(2): 220~231.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 王涛, 姜春发, 高联达, 李秋根, 陈隽璐, 张英利, 刘平, 谢春林, 向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. *地质学报*, 83(11): 1527~1546.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大栓, 等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 21~30.
- 徐通, 裴先治, 刘成军, 陈有炘, 李瑞保, 李佐臣, 裴磊. 2016. 南秦岭勉略构造带张儿沟新元古代变安山岩地球化学特征及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄——Rodinia 超大陆聚合事件的记录. *地质论评*, 62(2): 434~450.
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 向忠金, 陈隽璐, 王涛. 2007. 秦岭勉略构造混杂带康县—勉县段蛇绿岩块—铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义. *地质论评*, 53(6): 755~764.
- 张成立, 刘良, 张国伟, 王涛, 陈丹玲, 袁洪林, 柳小明, 晏云翔. 2004. 北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义. *地学前缘*, 11(3): 33~42.
- 张宏福, 于红. 2019. 造山带橄榄岩岩石学与构造过程: 以松树沟橄榄岩为例. *地球科学*, 44(4): 1057~1066.
- 张宗清, 唐索寒, 宋彪, 张国伟. 1997. 秦岭造山带晋宁期强烈地质事件及其构造背景. *地球学报*, 18(Z1): 43~45.
- 张宗清, 唐索寒, 张国伟, 杨永成, 王进辉. 2005. 勉县—略阳蛇绿混杂岩带镁铁质—安山质火山岩块年龄和该带构造演化的复杂性. *地质学报*, 79(4): 531~539.
- 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学. 北京: 地质出版社, 9~55.
- 赵志丹, 刘栋, 王青, 朱弟成, 董国臣, 周肃, 莫宣学. 2018. 锆石微量元素及其揭示的深部过程. *地学前缘*, 25(6): 124~135.



## The discovery of Neoproterozoic adakitic rocks in the east of South Qinling and its geological significance

CAI Wenchun<sup>1\*</sup>, ZENG Zhongcheng<sup>1,2)</sup>, ZHAO Pengbin<sup>1,2,3)</sup>, YANG Zongyong<sup>4)</sup>, LI Jingchen<sup>1)</sup>,  
WANG Mingzhi<sup>1)</sup>, ZHU Xueli<sup>1,3)</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>1)</sup>

1) Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an, 710068;

2) Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an, 710054;

3) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083;

4) Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550081

\* Corresponding author: geo\_cai@163.com

### Abstract

The Qinling orogenic belt is a composite continental collision orogenic belt, which records Neoproterozoic tectono-magmatic events. It is of great significance for understanding the convergence and collision process of the North and South Qinling terranes, and the assemblage of Rodinia supercontinent. Zircon geochronology, whole-rock major and trace elements geochemistry have been carried out for the Doufujian tonalites in the east of the South Qinling. Analyzed zircons yielded weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of  $860.7 \pm 6.0$  Ma, indicating magma emplaced in Neoproterozoic. The rocks were characterized by high  $\text{SiO}_2$  (62.41%~68.89%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.33%~17.33%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (4.23%~5.80%), and  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  ratio (1.11~2.41). They are enriched in rich Sr ( $>400 \times 10^{-6}$ ), but low MgO (0.55%~2.08%), Y ( $7.40 \times 10^{-6}$ ~ $18.20 \times 10^{-6}$ ), Yb ( $0.63 \times 10^{-6}$ ~ $1.62 \times 10^{-6}$ ), with high Sr/Y ratio (31.49~78.22), they also significantly rich in light rare earth elements [ $(\text{La}/\text{Yb})_N > 20$ ], but show weak Eu positive anomaly. They have typical characteristics of adakite rocks. Their high  $\text{K}_2\text{O}$  content (2.00%~4.31%), low MgO and high La/Yb ratio indicate that the rocks are typical calc-alkaline adakite rocks. Parental magmas were likely originated from partial melting of the thickened lower crust, and the crust thickness of the South Qinling terrane may be up to 65 km. Combined with the regional geological data, it is suggested that the Doufujian tonalites were formed in a continental collision setting resulting from the collision between the North and South Qinling terranes after the closure of the Songshugou oceanic basin, and were the magmatic response of the Rodinia supercontinent aggregation. The first identification of the early Neoproterozoic calc-alkaline adakite provides a strong evidence for the South and North Qinling collision event.

**Key words:** adakitic rocks; U-Pb chronology; Neoproterozoic; Songshugou oceanic basin; continental collision; South Qinling