

# 华北陆块南缘小秦岭地区早白垩世埃达克质 花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、 Hf 同位素和元素地球化学特征

高昕宇<sup>1,2</sup>, 赵太平<sup>1\*</sup>, 高剑峰<sup>3</sup>, 薛良伟<sup>4</sup>, 原振雷<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 香港大学 地球科学系, 香港 999077; 4. 河南省 国土资源科学研究院, 河南 郑州 450053)

**摘要:** 文峪和娘娘山花岗岩体位于华北陆块南缘小秦岭地区, 侵位于太古宇太华岩群中, 主要岩性为二长花岗岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 文峪和娘娘山黑云母二长花岗岩体形成时间分别为(135±7) Ma 和(139±4) Ma, 普遍含有大量继承锆石。两个岩体均属于具有高硅( $\text{SiO}_2 = 64.80\% \sim 73.30\%$ )、高铝( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.24\% \sim 19.21\%$ )、富碱( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.66\% \sim 9.37\%$ )、低镁( $\text{MgO} = 0.21\% \sim 0.73\%$ )特征的高钾钙碱性、准铝质到过铝质花岗岩( $\text{ACNK} = 0.93 \sim 1.24$ ), 富集轻稀土元素、亏损重稀土元素( $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 13.7 \sim 21.8$ )。除文峪岩体第 5 期侵入体外, 两个岩体均具有弱 Eu 负异常-Eu 正异常( $\delta\text{Eu} = 0.64 \sim 1.27$ , 平均 0.82), 富集 Sr、Ba, 亏损 Y、Yb。文峪晚期侵入的第 5 期侵入体具明显的 Eu 负异常(0.63~0.70, 平均 0.66), 中等的 Sr 含量, 亏损 Y、Yb。地球化学特征表明, 除文峪岩体第 5 期侵入体外, 两个岩体均属于高 Sr、低 Yb 含量的埃达克质花岗岩, 源区残留石榴子石而无斜长石残留, 形成于压力较高的加厚下地壳; 文峪第 5 期侵入体的低 Sr、Y 含量的特征表明源区除石榴子石外还有斜长石残留, 形成于加厚地壳向正常地壳减薄的环境。文峪岩体岩浆锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -19.92 \sim -12.25$ , 两阶段 Hf 模式年龄为 1961~2442 Ma, 反映物质来源以古元古代陆壳物质为主; 娘娘山岩体的岩浆锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 除一个点为 -8.08 外, 其余点介于 -29.74~ -20.18 之间, 两阶段 Hf 模式年龄除一个点为 1699 Ma 外, 其余点主要集中于 2460~3057 Ma 之间, 物质来源以新太古代陆壳为主。两者的继承锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和  $t_{\text{DM2}}$  年龄也均表明其来源于古元古代和新太古代的地壳物质, 与太华杂岩解体的古元古代和新太古代两个部分时限一致, 也与华北克拉通主要的地壳增长历史基本一致。结合两岩体地球化学特征和区域地质演化历史, 认为文峪和娘娘山岩体形成于幔源岩浆底侵加热, 促使下地壳部分熔融。从早期侵入体到晚期侵入体, 反映了花岗岩岩浆活动的源区或岩浆房逐渐向浅部迁移, 及地壳从挤压加厚向伸展减薄转换的过程。

**关键词:** 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 成因机制; 文峪花岗岩体; 娘娘山花岗岩体; 小秦岭

中图分类号: P59; P581 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2012)04-0303-23

## LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, Hf isotopic composition and geochemistry of adakitic granites in the Xiaolinling region, the south margin of the North China block

GAO Xin-yu<sup>1,2</sup>, ZHAO Tai-ping<sup>1\*</sup>, GAO Jian-feng<sup>3</sup>, XUE Liang-wei<sup>4</sup> and YUAN Zhen-lei<sup>4</sup>

1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Earth Sciences, the University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;

4. Academy of Land and Resources of Henan Province, Zhengzhou 450053, China

收稿日期(Received): 2011-07-04; 改回日期(Revised): 2011-11-01; 接受日期(Accepted): 2012-03-28

基金项目: 国家基础研究发展计划(2006CB403502); 河南省科技攻关项目(豫财招标采购(2006) 26407 号)

作者简介: 高昕宇(1984-), 女, 博士研究生, 矿物学岩石学矿床学专业, Email: purplegxy@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): ZHAO Tai-ping, E-mail: tpzhao@gig.ac.cn, Tel: +86-20-85290231

GAO Xin-yu et al.: Geochemistry and petrogenesis of adakitic granites in the Xiaolinling region

**Abstract:** Wenyu and Niangniangshan granites in the Xiaoqinling region, Henan Province, is tectonically located in the south margin of the North China Craton and intruded into the Archean Taihua Group. The two granites mainly consist of monzogranite. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Wenyu and Niangniangshan granites give weighted average ages of  $(135\pm 7)$  Ma and  $(139\pm 4)$  Ma, with abundant inherited zircon. The similar ages of these two granites indicate they belong to the same magmatic event. The two granites are roughly contemporaneous and geochemically similar to each other, i.e., both of them are high K calc-alkaline and metaluminous-peraluminous, enriched in silica ( $\text{SiO}_2 = 64.80\% \sim 73.30\%$ ), aluminum ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.24\% \sim 19.21\%$ ), alkali ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.66\% \sim 9.37\%$ ) contents and low MgO ( $0.21\% \sim 0.73\%$ ) content, ACNK values ( $0.93 \sim 1.24$ ), LREE, relatively depleted in HREE ( $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 13.7 \sim 21.8$ ). Except the fifth intrusive stage of Wenyu granite, both granites are enriched in Sr, Ba, depleted in low Y, Yb, with slightly negative to positive Eu anomalies ( $\delta\text{Eu} = 0.64 \sim 1.27$ , average 0.82), suggesting adakitic affinity formed by partial melting of the thickened lower crust, with garnet residual and no plagioclase residual. The fifth intrusive stage of Wenyu granite have medium Sr and Ba contents, and low Y and Yb contents, with obvious negative Eu anomaly ( $\delta\text{Eu} = 0.63 \sim 0.70$ , average 0.66), formed during the transition from thickened crust to normal crust. The Wenyu granite show  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values ranging from  $-19.92$  to  $-12.25$  and  $t_{\text{DM2}}$  ages of  $1961 \sim 2442$  Ma, suggesting that the primary magma originated from Paleoproterozoic continental crust; while the  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of the Niangniangshan granite range mainly from  $-29.74$  to  $-20.18$ , with the exception of one point,  $-8.08$ . Correspondingly, the  $t_{\text{DM2}}$  ages range between  $2460$  Ma and  $3057$  Ma, with the exception of one  $1699$  Ma, suggesting that the primary magma originated from Late Archean continental crust. The  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values and  $t_{\text{DM2}}$  of their inherited zircons also indicate both granites were formed by Paleoproterozoic and Late Archean crustal material, which is consistent with crustal growth history of the North China craton. The geochemistry data suggest that both granites were originated from partial melting of the thickened lower crust resulting from underplating of mantle derived magma. The differences between early stage granite and the late stage granite reflect the process of the shallow migration of granitic magmatism source or magma chamber and the transformation of crustal tectonic regimes from compression and thickening to extension and thinning.

**Key words:** zircon U-Pb age; Hf isotopic; petrogenesis; Wenyu granite; Niangniangshan granite; Xiaoqinling region

## 0 引言

华北陆块南缘是华北克拉通结晶基底的重要组成部分,自中生代开始,该区卷入秦岭造山带的地质演化过程<sup>[1-4]</sup>,随着三叠纪华北与扬子大陆板块对接后的地壳缩短,以及其后白垩纪岩石圈伸展拉伸减薄<sup>[5-8]</sup>,发育了晚中生代以中酸性岩浆为主的大规模岩浆侵位事件<sup>[9-10]</sup>。华北陆块南缘的小秦岭、熊耳山、外方山地区发育全球最大的栾川-洛南斑岩-夕卡岩型钼矿带和规模仅次于胶东金矿集区的小秦岭大型金矿集区<sup>[11]</sup>,以及众多中小型Pb-Zn-Ag矿床<sup>[12]</sup>。以往对华北陆块南缘地质演化的研究主要围绕金属矿床的成矿时代、物质和流体来源等问题<sup>[13-16]</sup>,从成矿响应的角度探讨构造演化规律,而对华北陆块南缘岩浆作用、岩石圈增厚、减薄以及壳-幔相互作用规律等问题的研究相对较少。岩浆作用,尤其是对岩浆岩侵位时代、岩石成因、物质来源的研究

是认识克拉通岩石圈增厚、减薄时空分布、壳幔作用及浅部地质响应的重要途径。因此,对华北陆块南缘的中酸性岩体的形成机制的研究,对于认识这个地区中生代岩石圈演化有非常重要的意义。

位于华北陆块南缘的小秦岭地区是我国重要的黄金产地,燕山期花岗岩浆活动频繁,是研究中生代岩浆作用和岩石圈构造演化的重要地区之一。小秦岭地区发育的中生代花岗岩岩体自西向东依次主要有老牛山岩体、华山岩体、文峪岩体和娘娘山岩体,主要岩石类型均为二长花岗岩。过去对小秦岭地区中生代花岗岩的研究主要是在研究小秦岭金矿过程中做过一些基础的岩石学和年代学工作,详细的地球化学和岩石成因探讨很有限<sup>[17-20]</sup>。开展花岗岩的研究不仅可以揭示地壳源区组成、岩石成因,而且有助于恢复区域构造演化历史。本文拟利用最新获得的岩石学和地球化学数据,讨论小秦岭地区文峪和娘娘山两个岩体的成因和构造背景,并在此

基础上讨论它对整个华北陆块南缘中生代岩浆作用研究的意义。

## 1 区域地质概况及岩石学特征

小秦岭位于华北陆块南缘, 秦岭造山带北缘, 小秦岭-熊耳山地块中西部, 其范围西起陕西省华山, 东至河南省灵宝-朱阳盆地西北边缘, 其南北两侧分别被近东西向的太要-故县断裂带和巡马道-小河断裂带所围限<sup>[21]</sup>(图 1)。出露的地层主要为太古宇-古元古界太华群变质岩系。区内花岗岩浆活动频繁, 老的花岗岩主要是前寒武纪吕梁期的桂家峪二长花岗岩体和晋宁期的小河二长花岗岩体, 燕山期花岗岩浆活动最为强烈, 地理位置上由西向东分布有老牛山、华山、文峪和娘娘山花岗岩体, 出露面积依次变小, 岩性以黑云二长花岗岩和黑云母花岗岩为主。此外, 小秦岭地区还广泛发育中基性岩墙, 多呈脉状、小岩株、岩枝形态产出, 侵入于太古宇-古元古界太华群或中生代花岗岩体中, 主要岩石类型有

辉绿岩、辉长辉绿岩及煌斑岩等<sup>[23-25]</sup>。

文峪岩体总体形态呈椭圆形, 长轴方向近东西向, 出露面积约 71 km<sup>2</sup>, 侵入太华群地层中, 接触面平直, 局部呈港湾状, 外倾, 倾角较陡, 为 50°~70°, 沿接触带部分区段岩体发育细粒冷凝边。岩体可分为 5 期侵入体, 第 1 期侵入体为岩脉状产出, 出露面积较小, 位于岩体的南部, 主要岩性为细粒黑云斜长花岗岩。第 2~4 期侵入体为文峪岩体的 3 个主要岩相带, 3 个期次呈环状分布。其中第 2 期侵入体为边缘相, 分布在岩体的外围, 岩性主要为粗-中粒含斑黑云母二长花岗岩; 第 3 期侵入体为过渡相, 岩性主要为中粒似斑状黑云母二长花岗岩。第 4 期侵入体为顶部相, 分布在岩体的中心, 岩性主要为中-细粒含斑黑云母二长花岗岩。第 5 期侵入体为岩脉状产出, 出露面积较小, 位于岩体东部, 岩性主要为细-中粒二长花岗岩。

娘娘山岩体平面形态近圆形, 南北略长, 面积约 33 km<sup>2</sup>。与围岩呈侵入接触关系, 接触面多外倾, 少部分为内倾, 倾角 30°~50°。岩体由 3 期岩浆侵入

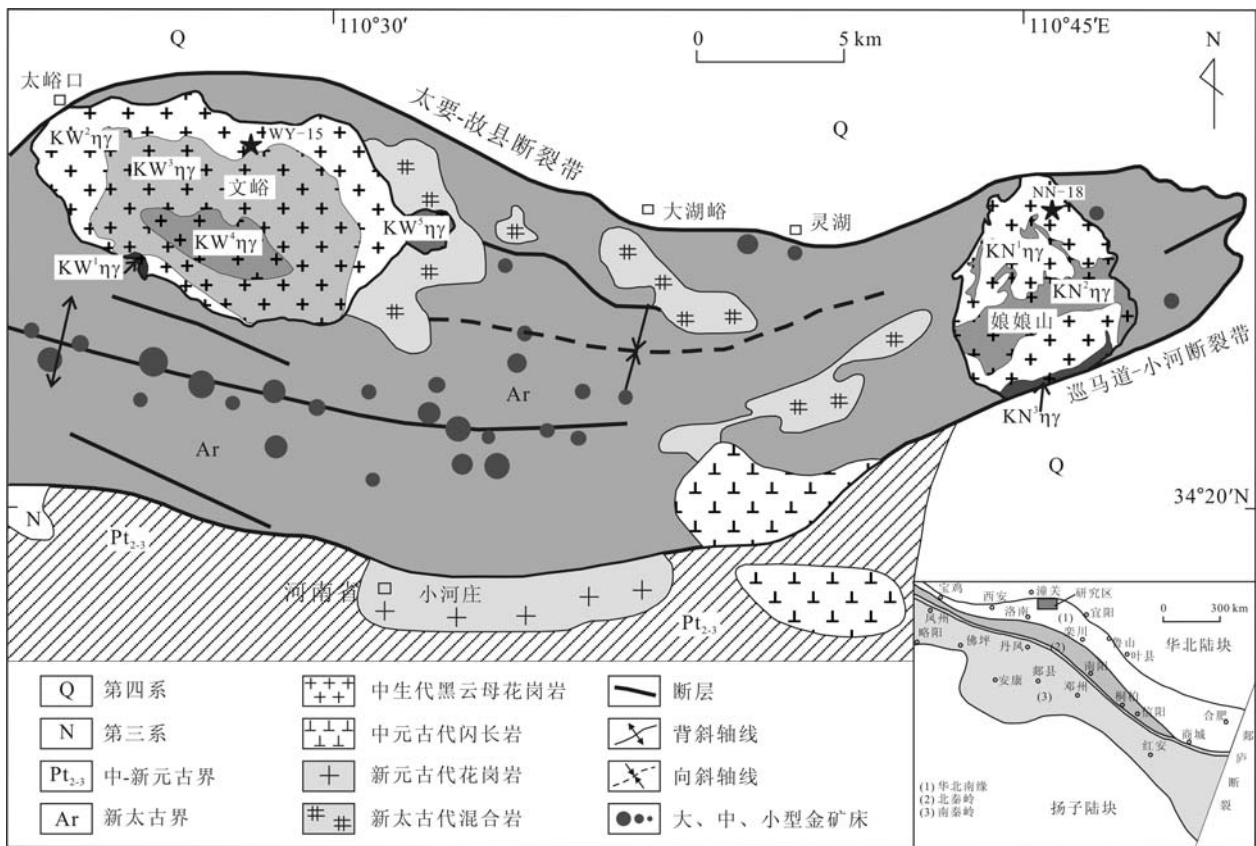


图 1 文峪和娘娘山花岗岩体地质简图(底图据文献[22])

Fig.1 Simplified geological map of the Wenyu and Niangniangshan granites (after reference [22])

形成,其中第1~2期侵入体为岩体的主要组成部分。第1期侵入体主要岩性为似斑状中粒黑云母二长花岗岩;第2期侵入体岩性主要为细中粒含斑黑云母二长花岗岩,位于岩体中部。第3期侵入体岩性主要为细粒二长花岗岩,呈条带状侵入于岩体南部。从各个期次的分布特征来看,岩体的主要岩相带从周边向中心,从早到晚,表现出同心环带状产出,具有规律的时空演化关系,即从早期侵入体到晚期侵入体,分别构成了一个较为完整的岩浆演化序列。

两个岩体具有相似的岩石组成,主要岩性为似斑状(含斑)黑云母二长花岗岩,主要矿物为钾长石(25%~35%)、斜长石(30%~40%)、石英(25%~30%)、黑云母(3%~5%)。副矿物组合以锆石、磷灰石、磁铁矿和榍石为主。岩石为块状构造,花岗结构、似斑状结构。斑晶为钾长石,钾长石主要为条纹长石和微斜长石,自形-半自形板状,具卡斯巴双晶及环带结构。斜长石主要为更长石,自形-半自形板状,聚片双晶和环带结构发育。石英为他形粒状,具波状消光。黑云母多呈褐色细小片状,少量黑云母被绿泥石、绿帘石交代置换。

## 2 样品及分析方法

主元素和微量元素测试在香港大学地球科学系进行。主元素用X射线荧光光谱法(XRF)测试,测试仪器为Philips PW 2400光谱仪。将约1g岩石粉末样品与四硼酸锂按1:7的比例混合后,在约1300℃的温度下,于铂金坩埚中熔融制成玻璃片,然后用XRF方法测定氧化物含量。主要氧化物的分析误差一般小于2%。微量元素及稀土元素用ICP-MS测试,所用质谱仪为Thermo Plasma-Quad Excell ICP-MS。将样品粉末(约0.05g)与HF和HNO<sub>3</sub>溶液混合后置于高压钢套中放在烘箱中于190℃下充分溶解。详细溶解和分析流程见文献[26]。在质谱分析过程中用Rh元素作为内标来校正仪器漂移<sup>[26]</sup>,实验室标样BHVO-2(玄武岩)、G-1(花岗岩)和GSR-1(花岗岩)作为参考标准,分析精度优于5%。

锆石U-Pb及Hf同位素定年分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成。U-Pb用Agilent公司的7500a型ICP-MS测试,Lu-Hf同位素测试用Thermo公司制造的Neptune型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)完成,加载德国Lamda Physik公司制造的Geolas193nm准分子激光取样系

统。激光束直径为60μm,剥蚀频率为8Hz,能量密度为15~20J/cm<sup>2</sup>,剥蚀时间约60s。详细的分析程序见Wu *et al.*<sup>[27]</sup>和谢烈文等<sup>[28]</sup>。锆石U-Pb同位素数据处理使用Glitter 4.0软件<sup>[29]</sup>、根据文献[30]进行普通铅校正后,U-Pb谐和线和加权平均年龄的计算及绘图用Isoplot 3.0软件<sup>[31]</sup>完成。数据标准化根据<sup>179</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf = 0.7325,质量歧视校正用指数法则进行,Yb和Lu的干扰校正取<sup>176</sup>Lu/<sup>175</sup>Lu = 0.02655和<sup>176</sup>Yb/<sup>172</sup>Yb = 0.5887<sup>[32]</sup>,而Yb分馏校正则根据<sup>172</sup>Yb/<sup>173</sup>Yb = 1.35272用指数法则进行<sup>[27]</sup>。

## 3 形成时代

本文分别对文峪岩体和娘娘山岩体进行LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,样品分别为粗粒黑云母二长花岗岩(WY-15,地理坐标34°29'47.5"N,110°28'14.3"E)、中粗粒黑云母二长花岗岩(NN-18,地理坐标34°28'43.9"N,110°45'40.8"E),两样品分别采自文峪岩体第2期侵入体和娘娘山岩体第2期侵入体。在样品分析过程中尽量选择生长环带明显、无包裹体和裂纹的锆石晶体,或者避开锆石颗粒中的裂纹和包裹体。对文峪和娘娘山花岗岩体的两件锆石样品分别进行了20和25个测点的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年分析,数据结果见表1和图2。

文峪和娘娘山花岗岩体均含有大量继承锆石,锆石U-Pb年龄主要集中于两个年龄范围(图2),老的年龄集中在4个期次,晚三叠世到早侏罗世(201~222 Ma)、早石炭世(326 Ma)、新元古代(637 Ma、783 Ma)、古元古代晚期(1732~1865 Ma)、古元古代早期到新太古代晚期(2045~2508 Ma),为继承锆石;新的年龄集中在晚侏罗世至早白垩世,为岩浆锆石,这些岩浆锆石在年龄谐和图(图2b和2d)上有部分数据点偏离谐和线,所以利用测点的加权平均年龄反映岩体的形成时代。文峪花岗岩锆石有7个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄数据范围是125~145 Ma,得到加权平均年龄为(135±7) Ma (MSWD = 6.6),代表文峪岩体形成年龄时间为早白垩世早期。娘娘山花岗岩锆石有13个测点的年龄数据范围是129~160 Ma,除谐和度非常低,偏离谐和线较大的年龄160 Ma之外,12个测点的加权平均年龄为(139±4) Ma (MSWD = 5.1),代表娘娘山岩体的形成时间也为早白垩世早期。文峪和娘娘山两个岩体岩浆锆石和继承锆石年龄接近,说明为同一期构造-热事件的产物。

表 1 小秦岭文峪和娘娘山花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Wenyu and Niangniangshan granites in the Xiaqingling region

测试点	同位素比值						同位素年龄 (Ma)					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	年龄	1 $\sigma$	年龄	1 $\sigma$	年龄	1 $\sigma$
WY-15-01	0.16501	0.00354	10.83773	0.21762	0.47640	0.00759	2508	36	2509	19	2512	33
WY-15-02	0.06559	0.00654	0.19810	0.01880	0.02191	0.00072	793	196	184	16	140	4
WY-15-03	0.06106	0.00166	0.18582	0.00478	0.02207	0.00029	641	57	173	4	141	2
WY-15-04	0.14214	0.00272	8.10894	0.14504	0.41381	0.00584	2253	33	2243	16	2232	27
WY-15-05	0.15209	0.00269	9.46732	0.15680	0.45150	0.00622	2370	30	2384	15	2402	28
WY-15-06	0.16168	0.00130	10.17659	0.07687	0.45655	0.00464	2473	14	2451	7	2424	21
WY-15-07	0.12617	0.00148	6.49146	0.07124	0.37319	0.00410	2045	21	2045	10	2044	19
WY-15-08	0.10932	0.00195	4.01535	0.06688	0.26641	0.00334	1788	32	1637	14	1523	17
WY-15-09	0.10760	0.00447	4.66704	0.18203	0.31460	0.00700	1759	74	1761	33	1763	34
WY-15-10	0.11173	0.00256	4.88400	0.10485	0.31706	0.00462	1828	41	1800	18	1775	23
WY-15-11	0.10326	0.00831	0.32420	0.02406	0.02277	0.00075	1684	142	285	18	145	5
WY-15-12	0.06503	0.00671	0.19827	0.01950	0.02211	0.00074	775	203	184	17	141	5
WY-15-13	0.06645	0.00529	0.18093	0.01360	0.01974	0.00056	821	158	169	12	126	4
WY-15-14	0.15570	0.00191	9.37170	0.10672	0.43649	0.00486	2410	21	2375	10	2335	22
WY-15-15	0.10998	0.00136	4.67625	0.05404	0.30834	0.00325	1799	22	1763	10	1733	16
WY-15-16	0.15478	0.00232	6.91341	0.09514	0.32391	0.00390	2399	25	2100	12	1809	19
WY-15-17	0.10601	0.00276	4.30998	0.10537	0.29483	0.00442	1732	47	1695	20	1666	22
WY-15-18	0.05580	0.00394	0.15041	0.01009	0.01955	0.00047	444	150	142	9	125	3
WY-15-19	0.21301	0.00332	3.04863	0.04091	0.10379	0.00128	2929	25	1420	10	637	8
WY-15-20	0.04759	0.00739	0.12870	0.01943	0.01961	0.00075	78	333	123	17	125	5
NN-18-01	0.10763	0.00134	3.83620	0.04450	0.25853	0.00281	1760	9	1600	9	1482	14
NN-18-02	0.10843	0.00125	3.91260	0.04203	0.26174	0.00279	1773	9	1616	9	1499	14
NN-18-03	0.05775	0.00123	0.17331	0.00350	0.02177	0.00025	520	25	162	3	139	2
NN-18-04	0.05332	0.00135	0.15015	0.00362	0.02043	0.00025	342	33	142	3	130	2
NN-18-05	0.09429	0.00183	0.29779	0.00530	0.02291	0.00028	1514	17	265	4	146	2
NN-18-06	0.08279	0.00814	0.24913	0.02289	0.02183	0.00081	1264	180	226	19	139	5
NN-18-07	0.09556	0.00291	0.68442	0.01922	0.05195	0.00081	1539	30	529	12	326	5
NN-18-08	0.16251	0.00181	9.58512	0.09928	0.42783	0.00477	2482	8	2396	10	2296	22
NN-18-09	0.09371	0.00594	0.30058	0.01766	0.02327	0.00060	1502	72	267	14	148	4
NN-18-10	0.05185	0.00295	0.16477	0.00893	0.02305	0.00046	279	87	155	8	147	3
NN-18-11	0.09242	0.00164	0.27949	0.00456	0.02194	0.00026	1476	15	250	4	140	2
NN-18-12	0.42723	0.01459	2.06304	0.05262	0.03503	0.00089	4008	17	1137	17	222	6
NN-18-13	0.07918	0.00461	0.23109	0.01260	0.02117	0.00048	1177	110	211	10	135	3
NN-18-14	0.10409	0.00462	0.33925	0.01377	0.02364	0.00049	1698	45	297	10	151	3
NN-18-15	0.12575	0.00288	2.23850	0.04661	0.12912	0.00185	2039	18	1193	15	783	11
NN-18-16	0.08327	0.00079	1.19241	0.01060	0.10387	0.00103	1276	9	797	5	637	6
NN-18-17	0.10876	0.00098	4.59495	0.03882	0.30645	0.00309	1779	8	1748	7	1723	15
NN-18-18	0.04605	0.00357	0.13436	0.00999	0.02116	0.00046	1603	172	128	9	135	3
NN-18-19	0.20868	0.00757	0.72504	0.02222	0.02520	0.00055	2895	24	554	13	160	3
NN-18-20	0.06024	0.00315	0.16809	0.00831	0.02024	0.00040	612	109	158	7	129	3
NN-18-21	0.10973	0.00145	3.39773	0.04177	0.22460	0.00249	1795	10	1504	10	1306	13
NN-18-22	0.10956	0.00345	0.33594	0.00961	0.02224	0.00036	1792	29	294	7	142	2
NN-18-23	0.11407	0.00078	4.68457	0.02982	0.29789	0.00288	1865	9	1764	5	1681	14
NN-18-24	0.18373	0.00871	0.80124	0.03269	0.03163	0.00084	2687	35	598	18	201	5
NN-18-25	0.36147	0.00969	1.61972	0.03361	0.03250	0.00064	3756	14	978	13	206	4

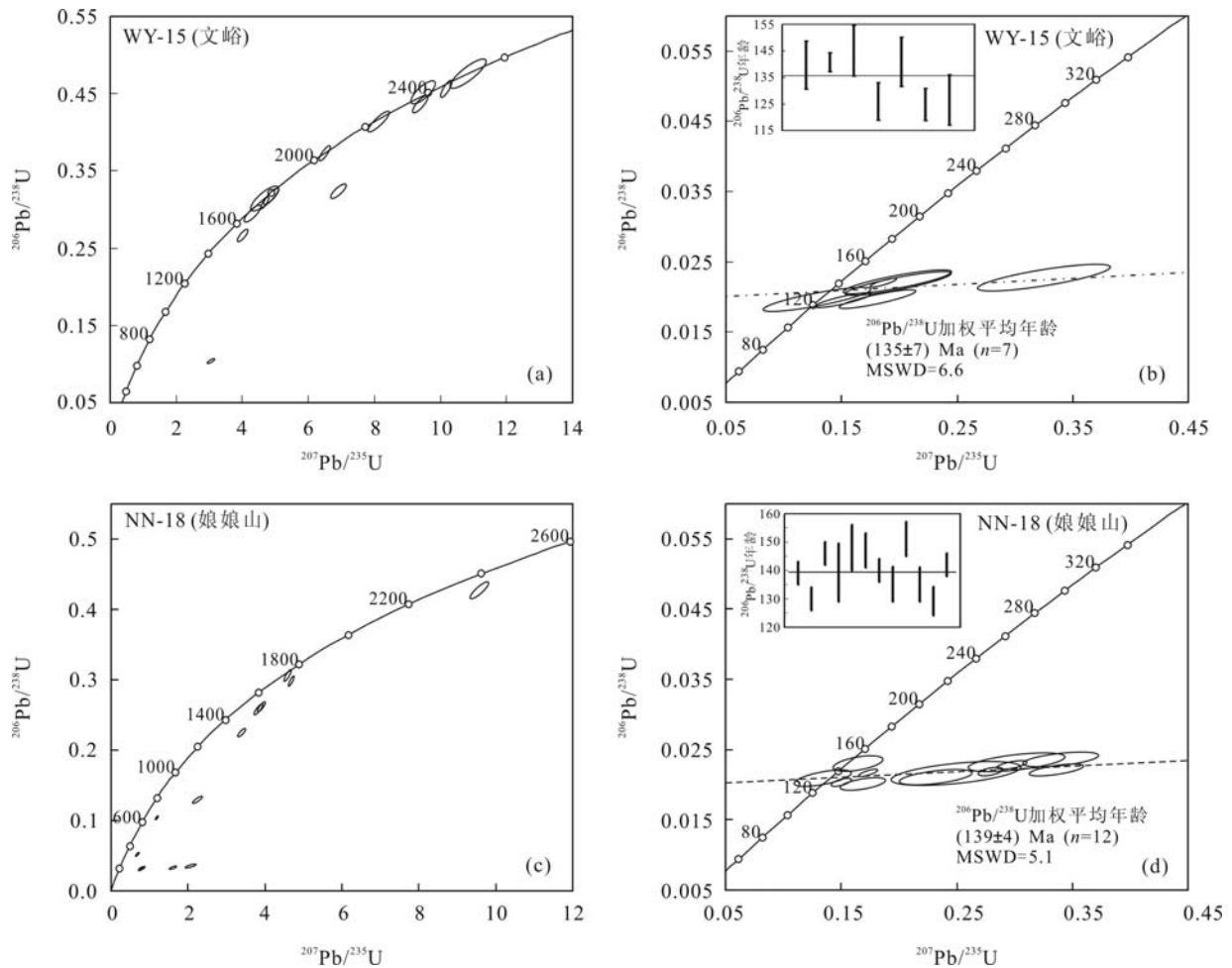


图2 文峪和娘娘山花岗岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig.2 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordant diagrams for the Wenyu and Niangniangshan granites

## 4 岩石地球化学特征

### 4.1 主元素

本研究用于地球化学分析的样品分别采自文峪岩体的第2期、第3期和第5期侵入体和娘娘山岩体的第2期侵入体, 样品的主元素分析结果列于表2。

两个岩体具有相似的主元素组成特征, 它们都表现为高硅( $\text{SiO}_2 = 64.80\% \sim 73.30\%$ )、高铝( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.24\% \sim 19.21\%$ )、低镁( $\text{MgO} = 0.21\% \sim 0.73\%$ )的特点。 $\text{Mg}^\#$  [ $\text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{\text{T}}) \times 100$ ,  $\text{FeO}^{\text{T}}$  为  $\text{Fe}^{2+}$ ] 值较低, 介于 27.6~39.0 之间。岩体碱含量较高,  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  分别为 3.89%~5.12% 和 2.57%~5.13%,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  为 0.82~1.99。在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解中(图3), 样品大部分落入高钾钙碱性系列, 文峪岩体的个别样品落入钾玄

岩系列区域。两个岩体的 ACNK ( $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ , 摩尔比) = 0.93~1.24, 其中娘娘山花岗岩样品的 ACNK 值普遍小于 1.1, 较文峪花岗岩样品偏低, 且文峪岩体第2期侵入体到第5期侵入体 ACNK 值呈上升趋势。在 ANK-ACNK 图解(图4)中, 娘娘山岩体均为准铝质-弱过铝质花岗岩, 文峪岩体第2期侵入体属于准铝质-弱过铝质花岗岩, 第3期和第5期侵入体属于强过铝质花岗岩, 表明文峪岩体的源岩相对娘娘山岩体有更多成熟度较高的地壳物质加入<sup>[35]</sup>。两个岩体的主元素与  $\text{SiO}_2$  均显示出较好的线性关系,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  与  $\text{SiO}_2$  呈明显的负相关关系(图3)。

### 4.2 微量元素

文峪和娘娘山花岗岩体的全岩微量元素和稀土元素分析数据见表2, REE 分布模式图及微量元素蛛网图见图5。

表 2 文峪和娘娘山花岗岩体主元素(%), 微量元素及稀土元素( $\mu\text{g/g}$ )分析结果Table 2 Major (%), trace and rare earth ( $\mu\text{g/g}$ ) element concentrations of the Wenyu and Niangniangshan granites

期次 样号	文峪岩体第 2 期侵入体										文峪岩体第 3 期侵入体	
	WY-01	WY-08	WY-09	WY-11	WY-13	WY-14	WY-21	WY-22	WY-23	WY-24	WY-19	WY-20
SiO <sub>2</sub>	66.27	64.80	69.30	70.10	67.16	68.04	65.26	68.65	69.64	73.30	67.01	68.63
TiO <sub>2</sub>	0.24	0.37	0.20	0.19	0.38	0.30	0.29	0.29	0.30	0.13	0.24	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.21	18.75	15.90	15.92	16.73	16.38	18.55	16.12	15.49	14.24	17.94	17.14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	1.78	2.53	1.80	1.14	2.43	1.91	2.21	2.13	2.12	1.06	1.91	1.61
K <sub>2</sub> O	4.26	4.04	5.05	5.13	4.28	4.02	4.47	4.25	4.09	4.64	5.07	4.01
MnO	0.07	0.08	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07	0.03	0.07	0.06
MgO	0.44	0.57	0.35	0.37	0.51	0.39	0.47	0.49	0.46	0.21	0.37	0.41
CaO	2.10	2.59	1.82	1.46	2.38	2.50	2.41	2.21	2.42	1.51	1.88	1.98
Na <sub>2</sub> O	4.31	4.82	4.18	4.23	5.07	4.90	4.62	4.59	4.74	3.96	4.29	4.31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.10	0.07	0.04	0.09	0.07	0.08	0.09	0.08	0.02	0.05	0.06
LOI	0.58	0.46	0.20	0.45	0.25	0.75	0.78	0.53	0.53	0.51	0.60	0.55
Total	99.30	99.12	98.92	99.08	99.34	99.31	99.20	99.41	99.93	99.62	99.42	98.98
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1.01	1.19	0.83	0.82	1.18	1.22	1.03	1.08	1.16	0.85	0.84	1.08
Mg <sup>#</sup>	32.9	30.9	27.6	39.0	29.4	28.9	29.6	31.2	30.2	28.4	27.8	33.4
ANK	1.64	1.52	1.29	1.27	1.29	1.32	1.49	1.33	1.27	1.23	1.43	1.50
ACNK	1.24	1.10	1.02	1.05	0.97	0.97	1.10	1.00	0.93	1.00	1.12	1.14
Cr	25.5	13.6	4.17	4.63	4.52	2.06	0.42	1.89	5.09	5.46	3.52	3.83
Rb	146	128	133	169	138	136	141	135	123	143	194	136
Sr	577	820	533	645	1029	771	818	707	730	401	648	638
Y	15.0	16.8	6.95	8.18	12.1	12.8	17.2	10.6	10.3	4.25	14.9	15.6
Zr	216	257	142	109	233	196	267	179	183	79.2	223	234
Nb	21.0	23.8	13.2	14.4	22.1	22.2	20.5	20.2	19.4	9.70	20.0	17.8
Cs	2.19	1.14	1.44	1.27	4.24	1.36	1.29	1.30	1.18	0.85	2.48	1.49
Ba	1095	861	1169	249		1422	447	1341	673	769	904	1202
Hf	5.25	6.86	4.03	3.08	6.19	5.33	7.19	4.99	5.13	2.32	6.16	6.46
Ta	1.08	1.36	0.77	0.89	1.27	1.30	1.20	1.14	1.08	0.54	1.32	1.09
Th	7.35	13.9	7.46	7.18	12.2	12.3	12.0	10.9	10.3	7.64	9.93	9.32
U	4.11	4.76	1.17	1.27	2.97	2.50	2.56	2.50	3.97	2.36	2.12	3.97
Nb/Ta	19.4	17.5	17.1	16.1	17.4	17.1	17.1	17.7	18.0	17.8	15.2	16.3
La	30.2	44.4	32.0	26.7	47.3	48.0	42.2	40.8	37.5	16.7	36.4	35.2
Ce	48.9	83.5	57.8	53.3	90.5	85.3	80.9	73.9	73.3	31.2	67.7	61.6
Pr	5.94	9.51	6.26	5.74	10.1	9.25	8.72	8.15	8.09	3.37	7.32	6.74
Nd	20.3	32.1	21.0	19.8	34.9	31.4	30.1	28.2	28.4	11.1	24.0	22.5
Sm	3.18	5.48	3.24	3.21	5.62	5.07	4.85	4.40	4.47	1.73	3.94	3.52
Eu	0.72	1.31	0.62	0.98	1.75	1.06	1.34	0.89	1.10	0.38	0.96	0.77
Gd	2.69	4.18	2.54	2.56	4.36	3.85	3.81	3.46	3.54	1.45	3.18	2.93
Tb	0.34	0.54	0.31	0.34	0.56	0.52	0.51	0.47	0.46	0.17	0.44	0.40
Dy	1.75	2.66	1.50	1.70	2.60	2.63	2.44	2.18	2.12	0.84	2.08	1.94
Ho	0.33	0.49	0.28	0.33	0.49	0.50	0.48	0.42	0.40	0.15	0.40	0.37
Er	1.00	1.39	0.79	0.96	1.33	1.44	1.36	1.16	1.13	0.45	1.20	1.11
Tm	0.15	0.20	0.11	0.13	0.19	0.20	0.19	0.16	0.15	0.06	0.18	0.16
Yb	1.11	1.45	0.78	1.01	1.28	1.46	1.37	1.17	1.10	0.50	1.31	1.20
Lu	0.17	0.21	0.11	0.15	0.20	0.21	0.20	0.17	0.17	0.08	0.20	0.19
ΣREE	117	187	127	117	201	191	179	166	162	68.0	149	139
ΣLREE	109	176	121	110	190	180	168	156	153	65.0	140	130
ΣHREE	7.54	11.1	6.43	7.18	11.0	10.8	10.4	9.19	9.07	3.71	8.99	8.30
ΣLREE/ΣHREE	14.5	15.9	18.8	15.3	17.3	16.7	16.2	17.0	16.8	17.4	15.6	15.7
(La/Yb) <sub>N</sub>	19.6	22.0	29.4	18.9	26.6	23.6	22.1	25.0	24.4	24.1	20.0	20.9
δEu	0.73	0.81	0.64	1.01	1.04	0.71	0.92	0.67	0.82	0.71	0.80	0.71
T (°C)	820	821	767	750	800	787	826	784	779	724	814	823

(续表 2)

期次 样号	文峪岩体第5期侵入体						娘娘山岩体第2期侵入体					
	WY-02	WY-03	WY-04	WY-05	WY-06	WY-07	NN-01	NN-02	NN-03	NN-04	NN-05	NN-07
SiO <sub>2</sub>	68.62	70.74	69.82	69.81	69.10	68.90	69.55	68.67	66.83	68.27	70.19	69.07
TiO <sub>2</sub>	0.19	0.17	0.18	0.18	0.20	0.17	0.26	0.29	0.36	0.36	0.26	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.78	16.65	16.91	17.20	16.97	17.42	15.73	16.03	16.54	15.81	15.18	15.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	1.66	1.48	1.41	1.51	1.52	1.22	2.18	1.93	2.75	2.84	2.10	2.12
K <sub>2</sub> O	4.52	3.99	4.21	4.43	4.10	4.10	4.09	4.15	3.34	3.31	4.36	4.01
MnO	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.04	0.08	0.07	0.05	0.06	0.05	0.07
MgO	0.35	0.34	0.34	0.34	0.37	0.27	0.49	0.54	0.62	0.63	0.48	0.50
CaO	1.36	1.22	1.38	1.28	1.53	1.20	2.27	2.48	3.27	3.14	2.32	2.57
Na <sub>2</sub> O	4.45	4.25	4.49	4.57	4.81	5.12	4.71	4.53	4.57	4.42	3.97	4.44
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.03	0.08	0.06	0.11	0.12	0.08	0.08
LOI	0.91	0.75	0.62	0.54	0.83	1.02	0.37	0.56	0.69	0.49	0.47	0.50
Total	99.94	99.69	99.44	99.96	99.51	99.48	99.80	99.30	99.15	99.44	99.47	99.54
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	0.98	1.06	1.07	1.03	1.17	1.25	1.15	1.09	1.37	1.34	0.91	1.11
Mg <sup>#</sup>	29.5	31.0	32.4	30.8	32.3	30.5	30.7	35.9	30.9	30.6	31.3	32.0
ANK	1.46	1.47	1.42	1.40	1.37	1.35	1.29	1.34	1.48	1.46	1.35	1.37
ACNK	1.21	1.23	1.17	1.17	1.12	1.16	0.96	0.97	0.97	0.95	0.98	0.97
Cr	4.65	2.25	1.42	1.28	3.86	2.40	2.40	8.28	1.48	3.61	0.91	0.37
Rb	220	206	201	230	211	186	113	114	52.2	64.6	77.7	111
Sr	322	236	339	368	425	312	648	709	973	936	657	695
Y	10.0	10.2	11.4	10.5	11.3	10.3	10.5	9.63	6.05	6.68	8.03	8.51
Zr	247	284	159	163	164	231	140	126	113	105	137	149
Nb	20.6	18.4	16.2	18.6	19.6	19.5	16.7	16.2	8.70	9.34	12.6	14.6
Cs	2.47	3.25	2.42	2.18	2.89	1.77	1.55	0.79	0.42	0.60	0.42	0.75
Ba	727	436	605	690	778	441	1025	596	83.7		237	1263
Hf	6.67	7.22	4.95	5.13	5.37	6.88	4.44	3.63	3.23	3.28	4.09	4.25
Ta	1.02	0.92	0.85	0.90	1.04	0.83	0.92	0.90	0.52	0.55	0.83	0.85
Th	13.1	6.12	6.99	12.6	15.8	16.4	9.86	7.95	4.50	6.33	6.85	7.99
U	3.69	2.28	4.00	3.34	6.50	3.06	1.80	2.01	1.70	1.43	0.97	1.55
Nb/Ta	20.1	19.9	19.1	20.7	18.9	23.6	18.2	18.0	16.7	17.0	15.2	17.2
La	18.8	15.3	20.2	20.9	23.7	19.8	32.1	33.6	24.6	26.1	30.9	30.4
Ce	28.1	23.3	36.1	39.0	43.0	35.8	57.7	63.9	49.5	53.5	60.5	54.6
Pr	3.44	2.87	3.85	4.05	4.46	3.72	6.32	7.02	5.61	6.06	6.56	6.02
Nd	11.9	10.0	13.1	13.9	15.2	12.3	21.9	24.8	19.9	21.8	22.9	21.0
Sm	1.81	1.55	2.04	2.14	2.27	1.83	3.56	4.07	3.49	3.68	3.70	3.50
Eu	0.38	0.33	0.39	0.40	0.44	0.38	0.83	1.10	1.32	1.35	1.08	0.72
Gd	1.58	1.33	1.58	1.61	1.76	1.33	2.86	3.13	2.70	2.87	2.94	2.74
Tb	0.16	0.14	0.18	0.19	0.21	0.15	0.40	0.42	0.32	0.34	0.37	0.36
Dy	0.84	0.66	0.91	0.92	1.02	0.67	1.99	2.04	1.44	1.58	1.78	1.79
Ho	0.15	0.13	0.17	0.17	0.18	0.12	0.38	0.37	0.23	0.27	0.32	0.32
Er	0.50	0.45	0.54	0.54	0.58	0.39	1.16	1.08	0.65	0.70	0.92	0.92
Tm	0.07	0.07	0.08	0.07	0.09	0.06	0.16	0.14	0.08	0.09	0.12	0.13
Yb	0.60	0.57	0.62	0.61	0.73	0.56	1.21	1.05	0.57	0.66	0.88	0.94
Lu	0.11	0.09	0.10	0.09	0.11	0.09	0.19	0.15	0.08	0.10	0.13	0.15
ΣREE	68.4	56.8	79.9	84.6	93.8	77.2	131	143	110	119	133	124
ΣLREE	64.4	53.4	75.7	80.4	89.1	73.8	122	134	104	112	126	116
ΣHREE	4.01	3.43	4.18	4.20	4.68	3.38	8.36	8.38	6.06	6.60	7.46	7.36
ΣLREE/ΣHREE	16.0	15.5	18.1	19.1	19.0	21.8	14.6	16.0	17.2	17.0	16.8	15.8
(La/Yb) <sub>N</sub>	22.4	19.2	23.4	24.5	23.4	25.4	19.1	23.1	31.2	28.4	25.0	23.1
δEu	0.68	0.69	0.64	0.63	0.65	0.70	0.77	0.91	1.27	1.22	0.97	0.69
T(°C)	834	852	792	794	789	823	760	752	740	735	763	766



(续表 2)

期次	娘娘山第 2 期侵入体										
	样号	NN-08	NN-09	NN-10	NN-11	NN-13	NN-14	NN-17	NN-18	NN-19	NN-20
SiO <sub>2</sub>	70.08	69.12	66.22	67.74	68.81	69.83	71.34	69.59	70.34	70.44	69.66
TiO <sub>2</sub>	0.28	0.31	0.33	0.35	0.26	0.23	0.21	0.24	0.22	0.26	0.27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.34	15.50	17.28	16.98	16.49	15.12	15.08	15.41	15.34	14.85	14.81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	2.11	2.37	2.59	2.62	2.41	1.80	1.71	1.91	1.43	1.93	2.27
K <sub>2</sub> O	3.78	3.91	3.53	2.57	4.25	4.07	3.71	4.08	3.68	3.73	3.81
MnO	0.06	0.08	0.08	0.09	0.08	0.07	0.05	0.06	0.05	0.06	0.07
MgO	0.49	0.54	0.63	0.73	0.50	0.37	0.46	0.42	0.38	0.42	0.53
CaO	2.37	2.37	2.78	2.96	2.10	2.04	1.95	2.11	2.19	2.00	2.32
Na <sub>2</sub> O	4.56	4.63	4.46	5.10	3.89	4.51	4.38	4.48	4.73	4.66	4.46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.11	0.11	0.09	0.10	0.05	0.06	0.05	0.04	0.05	0.10
LOI	0.40	0.34	0.73	0.74	0.65	0.96	0.86	0.63	0.64	0.68	1.18
Total	99.56	99.28	98.74	99.97	99.53	99.05	99.82	98.98	99.04	99.08	99.47
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1.21	1.18	1.26	1.99	0.92	1.11	1.18	1.10	1.29	1.25	1.17
Mg <sup>#</sup>	31.5	31.3	32.5	35.5	28.9	29.2	34.8	30.4	34.6	30.3	31.5
ANK	1.32	1.31	1.55	1.52	1.50	1.28	1.34	1.31	1.30	1.27	1.29
ACNK	0.96	0.96	1.07	1.03	1.11	0.97	1.02	0.99	0.97	0.97	0.94
Cr	5.34	0.66	0.95	1.78	3.87	1.24	2.43	3.18	0.22	0.83	1.03
Rb	108	115	89.7	88.3	125	112	100	100	91.8	97.1	80.9
Sr	676	698	766	694	642	649	588	679	676	659	599
Y	7.79	8.82	15.1	12.7	14.9	9.26	7.69	7.77	7.68	8.30	9.91
Zr	136	152	195	183	175	130	130	151	116	153	139
Nb	16.2	17.1	14.5	17.9	17.2	15.1	14.0	12.7	12.8	14.6	12.6
Cs	0.74	1.11	0.82	1.03	1.21	1.61	0.83	0.71	0.76	0.66	0.81
Ba	1278	917	1207	550	1497	999	1118	260	1208	1184	1304
Hf	4.01	4.33	5.01	5.20	4.89	3.96	3.98	4.18	3.50	4.19	3.91
Ta	0.89	0.98	0.82	0.95	0.88	0.80	0.77	0.70	0.72	0.79	0.91
Th	8.74	10.5	6.10	7.95	8.32	8.31	10.7	8.12	7.26	6.93	7.04
U	5.30	2.63	1.19	3.15	3.73	3.61	3.61	1.87	2.55	1.51	1.71
Nb/Ta	18.2	17.4	17.6	18.8	19.6	18.8	18.0	18.1	17.7	18.5	13.9
La	35.8	32.9	32.0	35.4	32.5	29.0	24.4	29.3	28.9	32.4	29.5
Ce	62.9	60.8	58.9	63.4	57.7	51.5	43.5	55.4	50.3	58.9	53.8
Pr	6.71	6.71	6.65	6.78	6.24	5.51	5.13	6.02	5.47	6.29	5.93
Nd	22.9	23.6	23.5	23.8	22.1	19.6	16.3	19.6	18.4	21.4	20.7
Sm	3.73	3.84	4.00	3.84	3.61	3.11	2.70	3.18	2.88	3.32	3.50
Eu	0.72	0.86	0.92	0.92	0.72	0.75	0.57	0.94	0.64	0.76	0.74
Gd	2.85	3.09	3.22	2.99	2.95	2.59	2.17	2.54	2.32	2.58	2.87
Tb	0.36	0.38	0.42	0.39	0.41	0.35	0.29	0.31	0.30	0.34	0.38
Dy	1.63	1.77	2.12	1.86	2.05	1.81	1.44	1.53	1.51	1.65	1.95
Ho	0.29	0.33	0.40	0.35	0.39	0.35	0.28	0.29	0.28	0.31	0.39
Er	0.83	0.92	1.19	1.04	1.16	1.05	0.86	0.86	0.83	0.88	1.12
Tm	0.11	0.13	0.16	0.14	0.16	0.15	0.12	0.13	0.12	0.12	0.16
Yb	0.83	0.96	1.19	1.04	1.24	1.15	1.00	0.90	0.89	0.92	1.26
Lu	0.14	0.15	0.17	0.16	0.18	0.18	0.16	0.15	0.14	0.14	0.20
ΣREE	140	136	135	142	132	117	98.9	121	113	130	123
ΣLREE	133	129	126	134	123	109	92.6	114	107	123	114
ΣHREE	7.04	7.72	8.89	7.96	8.53	7.61	6.30	6.70	6.39	6.92	8.32
ΣLREE/ΣHREE	18.9	16.7	14.2	16.8	14.4	14.4	14.7	17.1	16.7	17.8	13.7
(La/Yb) <sub>N</sub>	31.0	24.5	19.3	24.5	18.9	18.1	17.5	23.2	23.2	25.3	16.9
δEu	0.65	0.74	0.76	0.80	0.65	0.78	0.70	0.98	0.73	0.77	0.70
T(°C)	759	766	796	787	795	757	764	770	748	771	759

注: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 为全铁, ACNK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O), 摩尔比; ANK= Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O), 摩尔比; Mg<sup>#</sup>=Mg<sup>2+</sup>/(Mg<sup>2+</sup>+Fe<sup>2+</sup>)×100; δEu=2Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>); (La/Yb)<sub>N</sub> 为球粒陨石标准化值, 标准化值引自[33]; T 为锆石饱和温度, T<sub>Zr</sub>=12900/[2.95+0.85M+ln(496000/Zrmet)], M=(Na+K+2Ca)/(Al×Si), Zrmet 为锆含量<sup>[34]</sup>。

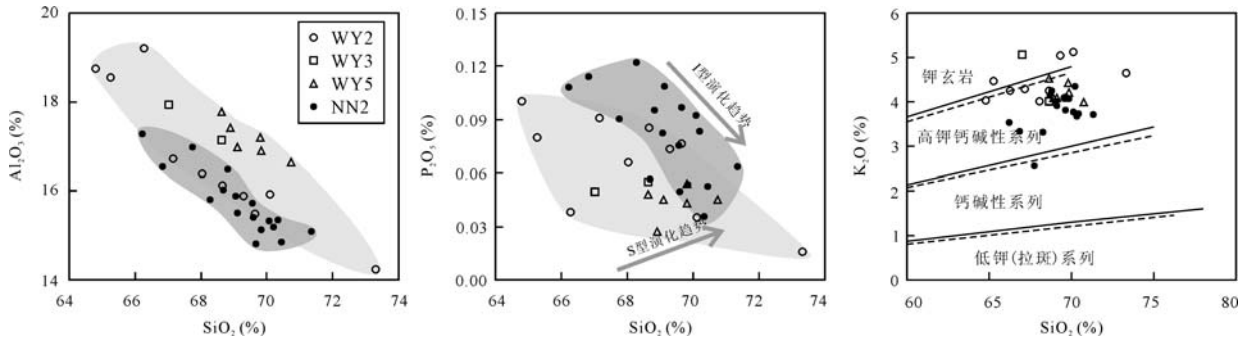


图3 文峪和娘娘山花岗岩体的哈克图解

Fig.3 Harker diagrams for Wenyu and Niangniangshan granites

WY2- 文峪岩体第2期侵入体; WY3- 文峪岩体第3期侵入体; WY5- 文峪岩体第5期侵入体; NN2- 娘娘山岩体第2期侵入体。  
 WY2- The second intrusive stage of Wenyu granite; WY3- the third intrusive stage of Wenyu granite; WY5- the fifth intrusive stage of Wenyu granite; NN2- the second intrusive stage of Niangniangshan granite.

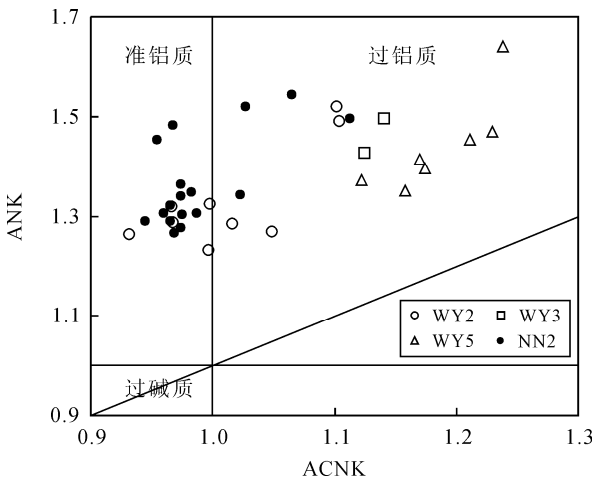


图4 文峪和娘娘山花岗岩体 ANK-ACNK 图解(图例同图3)  
 Fig.4 ANK-ACNK diagram of Wenyu and Niangniangshan granites (symbols are the same as those in Fig.3)

两个岩体均含有较低的稀土元素含量(56.8~201 μg/g)。其中文峪岩体第2期和第3期侵入体稀土含量相对较高, 介于 68.2~201 μg/g 之间, 平均 150 μg/g。而第5期侵入体稀土含量最低, 介于 56.8~93.8 μg/g 之间, 平均 76.8 μg/g, 在文峪岩体的稀土元素分布模式图(图5a)上, 与第2期和第3期侵入体有明显的区分。娘娘山岩体稀土总量介于 98.9~143 μg/g 之间, 平均 126 μg/g。在球粒陨石标准化稀土分布模式图(图5a和5b)上, 两个岩体各期次样品曲线平滑右倾, 均为轻稀土富集、重稀土亏损, 轻重稀土强烈分异( $\sum LREE/\sum HREE = 13.7\sim 21.8$ ,  $(La/Yb)_N = 16.9\sim 31.2$ )。其中文峪岩体第2期和第3期侵入体的  $\sum LREE/\sum HREE$  比值与娘娘山岩体相似, 介于 13.7~18.9 之间, 平均 16.2; 文峪岩体第5期侵入体  $\sum LREE/\sum HREE = 15.5\sim 21.8$ , 平均 18.3, 较其他期

次高。两个岩体  $\delta Eu = 0.63\sim 1.27$ , 平均 0.79, 总体表现为弱负 Eu 至 Eu 正异常。其中文峪岩体第2期和第3期侵入体的  $\delta Eu$  值与娘娘山岩体接近, 介于 0.65~1.27 之间, 平均 0.82; 文峪岩体第5期侵入体有更低的  $\delta Eu$  值(0.63~0.70)。

两个岩体的微量元素组成基本一致, 都富集 Ba、Sr、Rb、U 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、P、Ti, 具有较高的 Nb/Ta 比值(13.9~23.6)。Sr 含量变化于 236~1029 μg/g 之间, 平均 636 μg/g, 且文峪岩体由第2期侵入体到第5期侵入体 Sr 含量明显呈降低趋势(图6)。两岩体 Y 和 Yb 含量分别变化于 4.25~17.2 μg/g(平均 10.5 μg/g)和 0.50~1.46 μg/g(平均 0.97 μg/g), Sr/Y 比值(23.2~161, 平均 66.2)较高。在 Sr-Yb 图(图6)中, 文峪岩体第2期和第3期侵入体及娘娘山岩体样品点均投影于张旗等<sup>[36]</sup>归纳出的高 Sr 低 Yb 花岗岩区域, 而文峪第5期侵入体样品均落于低 Sr 低 Yb 花岗岩区域。文峪岩体 Rb 含量较娘娘山岩体明显偏高(图5), 尤其第5期侵入体 Rb 含量明显高于其他期次。除文峪岩体第5期侵入体外, 两岩体 Rb/Sr 比值为 0.05~0.36, 平均 0.17, 文峪岩体第5期侵入体 Rb/Sr 比值为 0.50~0.87, 平均 0.64, 明显高于其他各期次, 且高于中国东部上地壳平均值(0.31<sup>[37]</sup>)和全球上地壳平均值(0.32<sup>[38]</sup>), 反映其源区为成熟度较高的地壳物质, 与娘娘山岩体及文峪其他期次源区组成有差异, Rb/Sr 比值的显著较高, 进一步支持了分异作用的存在。从 Ba 和 Sr 的富集、Eu 弱负异常、Nb、Ta 和重稀土元素的亏损分析, 除文峪岩体演化晚期的第5期侵入体外, 文峪和娘娘山花岗岩岩浆演化过程中基本无斜长石结晶分异作用, 源区残留石榴子石<sup>[39]</sup>。

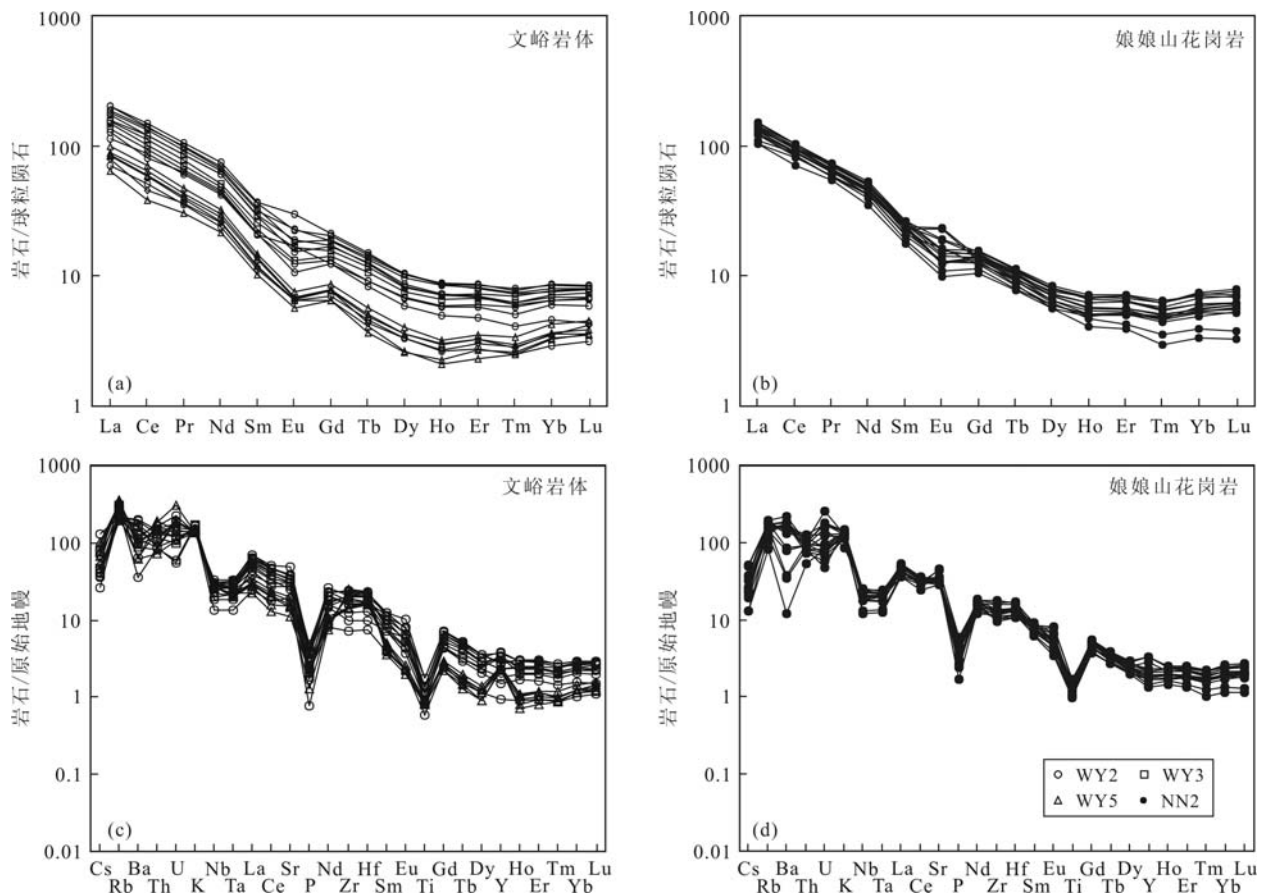


图 5 文峪和娘娘山花岗岩球粒陨石标准化 REE 配分模式图及原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig.5 Chondrite-normalized REE and PM-normalized incompatible element patterns of Wenyu and Niangniangshan granites  
样品符号同图 3。球粒陨石标准化值和 PM 标准值据文献[33]。

Symbols are the same as Fig.3. Chondrite values and PM values are from reference [33].

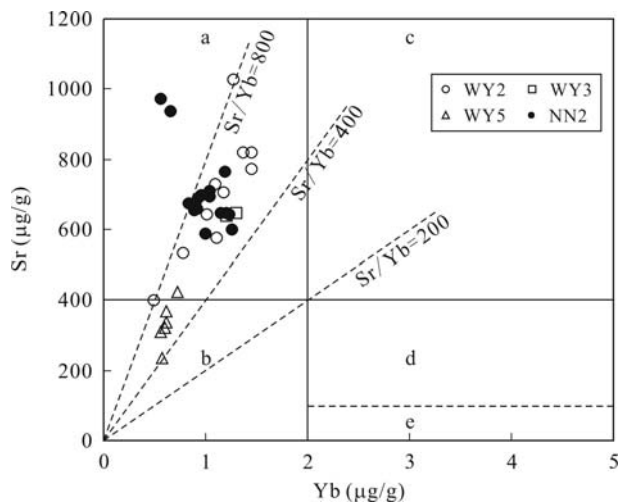


图 6 花岗岩 Sr-Yb 分类图(底图据文献[36], 样品符号同图 3)

Fig.6 The classification of granitoids on the basis of Sr and Yb contents (after reference [36], Symbols are the same as Fig.3)

a- 埃达克岩; b- 低 Sr 低 Y 型花岗岩; c- 高 Sr 高 Y 型花岗岩;  
d- 低 Sr 高 Y 型花岗岩; e- 极低 Sr 高 Y 型花岗岩。  
a- Adakite; b- low Sr, Y granite; c- high Sr, Y granite; d- low Sr, high Y granite; e- extreme low Sr, high Y granite.

## 5 Hf 同位素地球化学特征

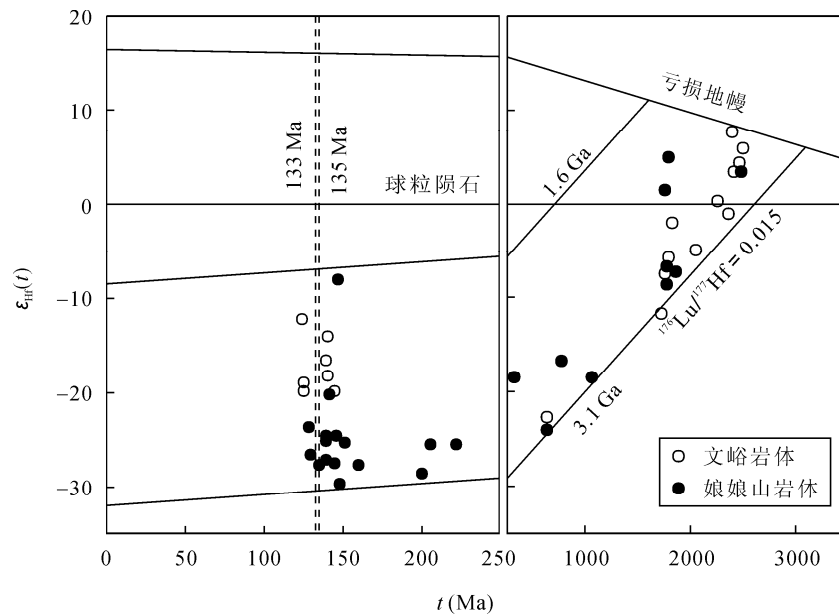
笔者选取已测年的 WY-15 和 NN-18 样品进行了锆石原位 Hf 同位素分析(表 3)。分析结果显示, 大部分锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值小于 0.002, 说明锆石在形成后具有较小的放射性成因 Hf 的积累。不同时期的继承锆石和新生锆石具有明显不同的 Hf 同位素组成, 继承锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分布于 0.281288~0.282053 之间, 对应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值较高, 变化于 -28.56~7.62 之间(表 3, 图 7); Hf 模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )集中在 2157~3124 Ma 之间。

岩浆锆石  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分布于 0.281850~0.282463 之间, 对应的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值均为负值, 变化范围为 -29.74~-8.08(表 3, 图 7)。其中文峪花岗岩  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -19.92~-12.25; 娘娘山花岗岩除一个点的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值较高为 -8.08 外, 其他点介于 -29.74~-20.18 之间,

表3 文峪和娘娘山花岗岩体 LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素原位分析测试结果  
Table 3 LA-MC-ICP-MS zircon Hf isotopic compositions of the Wenyu and Niangniangshan granites

测试点	<i>t</i> (Ma)	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	2σ	ε <sub>Hf</sub> (0)	ε <sub>Hf</sub> ( <i>t</i> )	<i>t</i> <sub>DM1</sub> (Ma)	<i>t</i> <sub>DM2</sub> (Ma)	<i>f</i> <sub>Lu/Hf</sub>
WY-15-01	2508	0.012671	0.000526	0.281371	0.000017	-49.56	5.86	2594	2647	-0.98
WY-15-02	140	0.022055	0.000960	0.282223	0.000018	-19.41	-16.58	1449	2233	-0.97
WY-15-03	141	0.025810	0.001278	0.282179	0.000015	-20.97	-18.17	1523	2332	-0.96
WY-15-04	2253	0.033536	0.001442	0.281416	0.000016	-47.97	0.28	2595	2791	-0.96
WY-15-05	2370	0.022119	0.001009	0.281288	0.000013	-52.48	-0.98	2739	2958	-0.97
WY-15-06	2473	0.013987	0.000562	0.281354	0.000015	-50.16	4.40	2619	2709	-0.98
WY-15-07	2045	0.021686	0.000902	0.281378	0.000014	-49.30	-4.87	2609	2947	-0.97
WY-15-09	1759	0.010724	0.000426	0.281471	0.000014	-45.99	-7.33	2452	2880	-0.99
WY-15-10	1828	0.010013	0.000431	0.281580	0.000013	-42.14	-1.92	2305	2600	-0.99
WY-15-11	145	0.021562	0.000921	0.282129	0.000015	-22.75	-19.92	1579	2442	-0.97
WY-15-12	141	0.007316	0.000276	0.282292	0.000014	-16.99	-14.10	1330	2077	-0.99
WY-15-13	126	0.013602	0.000561	0.282344	0.000013	-15.12	-12.25	1267	1961	-0.98
WY-15-14	2410	0.023563	0.000887	0.281381	0.000013	-49.20	3.41	2605	2721	-0.97
WY-15-15	1799	0.002811	0.000110	0.281481	0.000013	-45.67	-5.72	2420	2812	-1.00
WY-15-16	2399	0.019962	0.000833	0.281504	0.000014	-44.86	7.62	2434	2455	-0.97
WY-15-17	1732	0.023128	0.000840	0.281381	0.000012	-49.20	-11.64	2601	3124	-0.97
WY-15-18	125	0.013480	0.000563	0.282129	0.000012	-22.73	-19.86	1563	2439	-0.98
WY-15-19	637	0.023006	0.000899	0.281745	0.000020	-36.31	-22.68	2107	2986	-0.97
WY-15-20	125	0.033419	0.001266	0.282154	0.000015	-21.84	-19.04	1557	2387	-0.96
NN-18-01	1760	0.032841	0.000893	0.281736	0.000020	-36.65	1.52	2120	2336	-0.97
NN-18-02	1773	0.020262	0.000627	0.281436	0.000018	-47.26	-8.53	2513	2964	-0.98
NN-18-03	139	0.137265	0.005139	0.282004	0.000017	-27.17	-24.67	1970	2736	-0.85
NN-18-04	130	0.090744	0.003523	0.281945	0.000017	-29.24	-26.60	1967	2858	-0.89
NN-18-05	146	0.156494	0.006069	0.282007	0.000016	-27.05	-24.64	2021	2733	-0.82
NN-18-06	139	0.040812	0.001451	0.281924	0.000020	-29.99	-27.17	1889	2896	-0.96
NN-18-07	326	0.017481	0.000576	0.282053	0.000017	-25.42	-18.38	1668	2489	-0.98
NN-18-08	2482	0.021423	0.000705	0.281329	0.000015	-51.04	3.44	2663	2773	-0.98
NN-18-09	148	0.029384	0.001044	0.281850	0.000017	-32.60	-29.74	1971	3057	-0.97
NN-18-10	147	0.033412	0.001136	0.282463	0.000017	-10.94	-8.08	1120	1699	-0.97
NN-18-11	140	0.146174	0.005986	0.281994	0.000016	-27.51	-25.08	2036	2761	-0.82
NN-18-12	222	0.045292	0.001646	0.281920	0.000019	-30.13	-25.51	1904	2856	-0.95
NN-18-13	135	0.019629	0.000690	0.281907	0.000018	-30.59	-27.69	1874	2930	-0.98
NN-18-14	151	0.023355	0.000840	0.281974	0.000016	-28.22	-25.34	1789	2783	-0.97
NN-18-15	783	0.037907	0.001561	0.281836	0.000023	-33.10	-16.66	2017	2721	-0.95
NN-18-16	637	0.049885	0.001603	0.281714	0.000014	-37.41	-24.08	2190	3073	-0.95
NN-18-17	1779	0.034501	0.001129	0.281502	0.000015	-44.90	-6.63	2455	2852	-0.97
NN-18-18	135	0.039195	0.001545	0.281913	0.000018	-30.37	-27.56	1908	2920	-0.95
NN-18-19	160	0.030123	0.001172	0.281907	0.000015	-30.58	-27.73	1898	2931	-0.96
NN-18-20	129	0.038615	0.001566	0.282022	0.000013	-26.53	-23.71	1757	2681	-0.95
NN-18-21	1795	0.029883	0.001012	0.281812	0.000018	-33.96	4.85	2022	2157	-0.97
NN-18-22	142	0.028104	0.001194	0.282121	0.000015	-23.03	-20.18	1602	2460	-0.96
NN-18-23	1865	0.042954	0.001499	0.281444	0.000015	-46.95	-7.26	2559	2956	-0.95
NN-18-24	201	0.080500	0.002535	0.281849	0.000019	-32.62	-28.56	2052	3030	-0.92
NN-18-25	206	0.028468	0.001137	0.281929	0.000016	-29.82	-25.45	1866	2842	-0.97

注: 表中 锆石 Hf 同位素组成的计算参数为: <sup>176</sup>Lu 衰变常数 λ = 1.867×10<sup>-11</sup>[40]; 球粒陨石和亏损地幔的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf, <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 分别为 0.03321、0.282772、0.03842、0.28325<sup>[41-42]</sup>; 平均地壳 *f*<sub>Lu/Hf</sub> = -0.55<sup>[43]</sup>

图 7 文峪和娘娘山花岗岩体锆石 Hf 同位素组成及  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  图解Fig. 7 Zircon Hf isotopic compositions and plots of  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  vs. age for the Wenyu and Niangniangshan granites

较文峪花岗岩低; Hf 模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )集中在 1699~3057 Ma 之间(图 7), 其中文峪花岗岩  $t_{\text{DM2}}$  变化范围为 1961~2442 Ma, 娘娘山花岗岩的  $t_{\text{DM2}}$  除一个点为 1699 Ma 外, 其他点的变化于 2460~3057 Ma 之间, 较文峪花岗岩的模式年龄老。

两个岩体的岩浆锆石均显示了很大的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  变化范围, 文峪岩体  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化于 -19.92~ -12.25 之间, 变化幅度达 8 个  $\epsilon_{\text{Hf}}$  单位, 娘娘山岩体  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值主要变化于 -29.74~ -20.18 之间, 变化幅度达 9 个  $\epsilon_{\text{Hf}}$  单位, 如此大的变化, 表明岩浆形成过程应为一个开放的系统<sup>[44-45]</sup>, 岩浆源区组成较为复杂。

## 6 讨论

### 6.1 岩石成因

文峪和娘娘山花岗岩体的岩性都为黑云母二长花岗岩, 其暗色矿物为黑云母, 不含白云母, 出现磁铁矿、榍石等副矿物。两岩体均属于具有高硅( $\text{SiO}_2 = 64.80\% \sim 73.30\%$ )、高铝( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.24\% \sim 19.21\%$ )、富碱( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.66\% \sim 9.37\%$ )、低镁( $\text{MgO} = 0.21\% \sim 0.73\%$ )特征的高钾钙碱性、准铝至过铝质花岗岩( $\text{ACNK} = 0.93 \sim 1.24$ )。两者主微量元素地球化学特征相似, 在  $\text{P}_2\text{O}_5$  随  $\text{SiO}_2$  变化的图解(图 4)上, 两个岩体的  $\text{P}_2\text{O}_5$  与  $\text{SiO}_2$  含量均呈负相关关系,

总体沿 I 型演化趋势分布<sup>[46]</sup>。

如前所述, 文峪和娘娘山岩体表现出亏损 Y (4.25~17.2  $\mu\text{g/g}$ , 平均 10.5  $\mu\text{g/g}$ )和 Yb (0.50~1.46  $\mu\text{g/g}$ , 平均 0.97  $\mu\text{g/g}$ ), 中-高 Sr (236~1029  $\mu\text{g/g}$ , 平均 636  $\mu\text{g/g}$ ), 在原始地幔蛛网图上表现出 Sr 的正异常, 岩石的  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  比值介于 16.9 ~ 31.2 之间, Sr/Y 比值介于 23.2~161 之间, 其中文峪第 5 期侵入体介于 23.2~37.5 之间, 两岩体其他期次介于 38.5~161 之间。除文峪第 5 期侵入体 Eu 负异常值 (0.63~0.70) 较大外, 两岩体其他期次具有微弱的负的或正的 Eu 异常值 (0.64~1.27, 平均 0.82)。上述特征类似于埃达克岩<sup>[47-48]</sup>的地球化学特征, 在 Sr/Y-Y 的熔融曲线图(图 8a)中, 样品投点大多数落在榴辉岩和石榴子石角闪岩演化线附近, 说明两个花岗岩体与石榴子石处于平衡, 且大部分样品点均落入加厚下地壳熔融形成的埃达克岩范围内, 具有深源的特点。在  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-\text{Yb}_{\text{N}}$  图(图 8b)中, 文峪和娘娘山花岗岩体的数据也大体位于 10% 石榴子石角闪岩部分熔融演化线附近, 处于加厚下地壳熔融形成的埃达克质岩分布区内。文峪和娘娘山岩体的地球化学特征显示, 它们富  $\text{SiO}_2$ 、贫  $\text{MgO}$ , 与高场强元素相比富集大离子亲石元素(如 Rb、Ba、Sr), 重稀土元素亏损。石榴子石是导致花岗岩轻重稀土元素强烈分异的最重要的矿物相<sup>[50]</sup>, 文峪和娘娘山花岗岩体具

有低的 HREE、Y、Yb 的含量,表明源区有石榴子石存在。岩石低的 Yb/Lu (5.63~7.13)和 Dy/Yb (1.16~2.54)比值也表明其源区残留大量角闪石<sup>[51]</sup>。两岩体除文峪岩体第 5 期侵入体外均富 Al 和 Sr, 有微弱的负的或正的 Eu 异常,说明岩浆部分熔融时斜长石大量分解因而在源区残留体中少有斜长石存在,源岩为榴辉岩或麻粒岩;而文峪岩体第 5 期侵入体 Al 含量更高, Sr 含量相对较低,有弱负 Eu 异常,说明残留相中有斜长石存在。结合熔融曲线和岩体地球化学特征推测残留相主要以石榴子石、角闪石、辉石为主,文峪岩体第 5 期侵入体残留相还包括少量斜长石。石榴子石稳定出现的压力至少大于 0.8~1.0 GPa,通常大于 1.5 GPa<sup>[39]</sup>,因此文峪和娘娘山岩体主要侵入体的岩浆部分熔融压力大于 1.5 GPa,相应的深度至少大于 40 km,而文峪岩体晚期的第 5 期侵入体形成压力较低,为中等压力下形成,形成深度相对较浅,说明此时地壳厚度较早期侵入体形成时期明显减薄。

文峪和娘娘山都具有多阶段多期次侵入的特点,且各期次侵入体的岩石学和地球化学特征有所差别,即晚期侵入体比早期侵入体含有更高的 ACNK 值,低的稀土元素总量、Sr 含量和 Sr/Y 比值,高的负 Eu 异常值和 Rb/Sr 比值。这些地球化学特征的演变,反映了第 5 期侵入体形成压力较低,形成深度相对变浅,且源岩含有更多成熟度较高的地壳物质。传统观点认为这种大型花岗岩体是由单一的花岗质岩浆房经过缓慢冷却、岩浆结晶分异作用形成的<sup>[52]</sup>。但

是地球物理研究表明,即使在活动型大陆边缘的岛弧地壳之下也不存在大规模的熔融区域<sup>[53-54]</sup>,同时热力学研究表明,一个大的花岗质岩浆房在数十万年内,其温度就可以降至锆石 U-Pb 体系和角闪石 K-Ar 体系的封闭温度之下<sup>[55]</sup>,因此一般的花岗质岩浆房在数十万年内其温度就可以降至其液相线温度以下<sup>[56]</sup>。前人大量的研究表明,一些大的花岗岩体并不是由单一的岩浆房经过缓慢的冷却和结晶分异作用形成的,而是由不同批次、不同来源的花岗质岩浆在一定地质阶段内经过复杂的汇聚作用形成的,岩体各期次侵入体的岩石学及地球化学演变趋势是由于岩石的源区物质和熔融程度、温度压力等部分熔融条件不同所导致的<sup>[56-62]</sup>。因此,笔者认为文峪岩体侵入期次从早到晚的地球化学特征变化并不是由岩浆结晶分异作用形成的,而是部分熔融程度不同,及各期次形成的源区环境由石榴子石相平衡向斜长石相平衡的转变,即地壳由厚变薄,岩浆房逐渐向浅部迁移,源区物质发生变化,后期有更多成熟度高的地壳物质熔融导致的。

## 6.2 物质来源

近年来,对华北克拉通基底岩石高质量的锆石 U-Pb 定年结果证明,其最重要的年龄组是 2.4~2.5 Ga,其比例大大高于其他年龄组,同时还有 1.7~1.9 Ga 和 2.0~2.2 Ga 的年龄存在<sup>[63-65]</sup>。继承锆石是示踪岩浆源区性质的有效指示剂<sup>[66]</sup>。文峪和娘娘山花岗岩中的继承锆石主要由古元古代年龄组成(图 9,表 3):

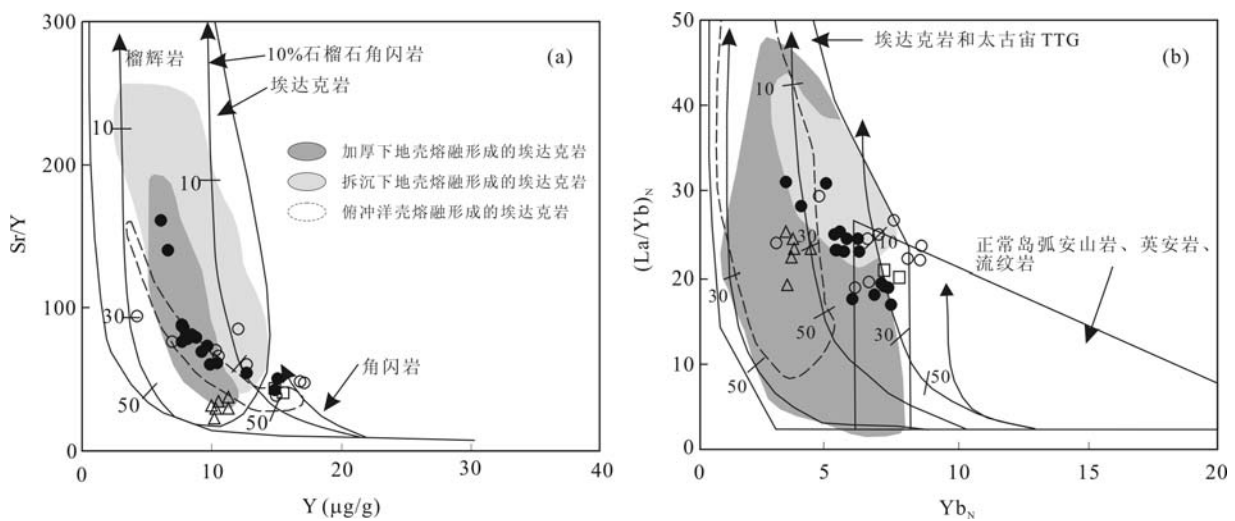


图 8 文峪和娘娘山花岗岩体 Sr/Y-Y (a)和(La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub> (b)图(据文献[49], 样品符号同图 3)

Fig.8 Sr/Y-Y diagram (a) and (La/Yb)<sub>N</sub>-Yb<sub>N</sub> diagram (b) for the Heyu and Niangniangshan granites (after reference [49]. Symbols are the same as Fig.3)

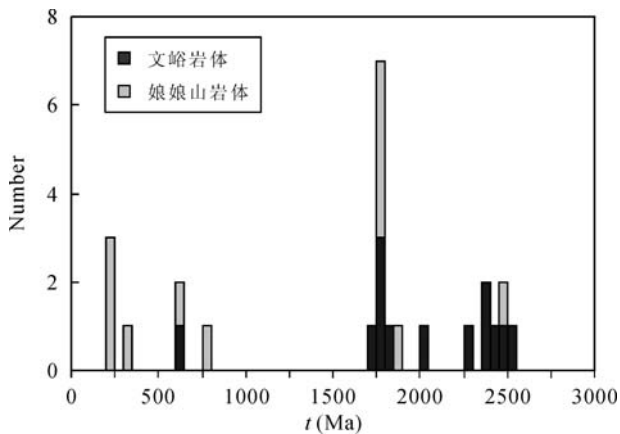


图 9 文峪和娘娘山花岗岩体中继承锆石年龄组成

Fig.9 Ages of inherit zircon in Wenyu and Niangniangshan granites

1732~1828 Ma、2045 Ma、2253 Ma、2370~2508 Ma(文峪岩体); 1760~1865 Ma、2480 Ma(娘娘山岩体), 这与华北克拉通基底的形成时代相吻合, 反映了岩浆源区为华北克拉通结晶基底。

文峪和娘娘山岩体低的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和古老的 Hf 模式年龄, 以及岩体中古元古代继承锆石的存在, 表明其岩浆源区应为古老的下地壳物质。不同的锆石组分, 记录了不同的岩浆源区性质。文峪岩体中 637 Ma 继承锆石显示了较低的 Hf 同位素比值( $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -22.68$ ; 图 7, 表 3), 结合其古老的两阶段 Hf 模式年龄 (2986 Ma), 表明形成它们的初始物质主要来源于新元古代陆壳; 1732~1828 Ma 的继承锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-11.64 \sim -1.92$ , 其两阶段模式年龄为 2600~3124 Ma, 表明形成它们的初始物质主要来源于新太古代陆壳; 2045~2508 Ma 的继承锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-4.87 \sim 7.62$ , 具有正的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 两阶段模式年龄为 2455~2958 Ma, 在图 7 中部分投影点位于球粒陨石演化线之上, 表明它们的源区存在有相当比例的来自亏损地幔的物质, 同时新太古代陆壳物质的贡献也很明显。娘娘山岩体中 201~783 Ma 的继承锆石具有较低的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值( $-28.56 \sim -16.66$ )及新太古代的两阶段 Hf 模式年龄(2721~3073 Ma), 反映这些继承锆石主要来源于新太古代陆壳物质; 1760~1865 Ma 的继承锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-8.53 \sim 4.85$ , 两阶段模式年龄为 2157~2964 Ma, 表明它们来源于古元古代和新太古代陆壳物质, 且陆壳形成时有幔源物质的参与; 样品 NN-18-08 点(2480 Ma)的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 3.44,  $t_{\text{DM2}}$  为 2773 Ma, 也反映新太古代陆壳形成时有幔源物质的参与。文峪岩体的中生代新生岩浆锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值

为  $-19.86 \sim -12.25$ , 两阶段 Hf 模式年龄为 1961~2442 Ma, 也反映初始物质来源于古元古代陆壳物质。而娘娘山岩体的中生代新生岩浆锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值比文峪岩体低, 除一个点为  $-8.08$  外, 其余点介于  $-29.74 \sim -20.18$  之间, 两阶段 Hf 模式年龄除一个点为 1699 Ma 外, 其余点主要集中于 2460~3057 Ma, 表明岩体源区与文峪岩体有差别, 主要来源于新太古代陆壳物质。以上表明, 两个岩体中新生锆石和继承锆石的初始物质主要来源于古元古代和新太古代陆壳, 这与华北克拉通主体形成于太古宙, 并以 2.40~2.50 Ga 为主, 部分地区经历了古元古代的高级变质作用相一致<sup>[63-65]</sup>。

小秦岭地区的基底岩石为太华群(杂岩)。由于本区太华群形成后遭受了多次构造-热事件的叠加改造, 岩石变形强烈、变质程度较高、混合岩化强烈、地层对比较为困难, 多数学者将其作为新太古代的深变质岩系<sup>[20,67,68]</sup>, 且一些学者得到太华群(杂岩)的同位素年龄大于 2.5 Ga<sup>[69-72]</sup>。现有的研究资料表明<sup>[73-76]</sup>, 太华群(杂岩)主要由两部分组成: 下部(太华下亚群)为基性火山岩建造, 以 TTG 长英质片麻岩为主, 形成时代为新太古代; 上部(太华上亚群)为高级变质岩系, 形成时代为古元古代, 两者在原岩建造、岩石组合、岩浆活动、变质变形及地球化学特征上存在着较大差异。丁莲芳<sup>[77]</sup>也在太华群表壳岩系中发现藻类化石, 将太华群上部划归古元古界, 下部为新太古界。两部分的时限与本次测试得到的娘娘山和文峪花岗岩分别为古元古代和新太古代的两阶段模式年龄一致。

### 6.3 构造环境

秦岭造山带是华北和扬子两大板块于中生代初期(245~235 Ma)全面碰撞而最终闭合的, 并成为中国大陆统一拼合的主要结合带<sup>[78]</sup>。碰撞阶段早期发生陆内俯冲, 岩石圈强烈挤压缩短增厚, 在华北陆块南缘形成自北而南逆冲推覆的洛南-栾川逆冲推覆构造系<sup>[79]</sup>, 小秦岭地区在区域挤压构造体制下形成太华推覆体<sup>[79-80]</sup>。直至中侏罗世晚期, 两者的全面拼合过程完成<sup>[78]</sup>。至中侏罗世-早白垩世(约 163~136 Ma), 区域构造体制发生转换<sup>[81-83]</sup>, 碰撞后强烈增厚的地壳开始趋于伸展减薄。岩石圈减薄可能开始于 145 Ma<sup>[15,84,85]</sup>。文峪和娘娘山岩体的形成年龄正对应于中侏罗世至早白垩世由挤压增厚向伸展减

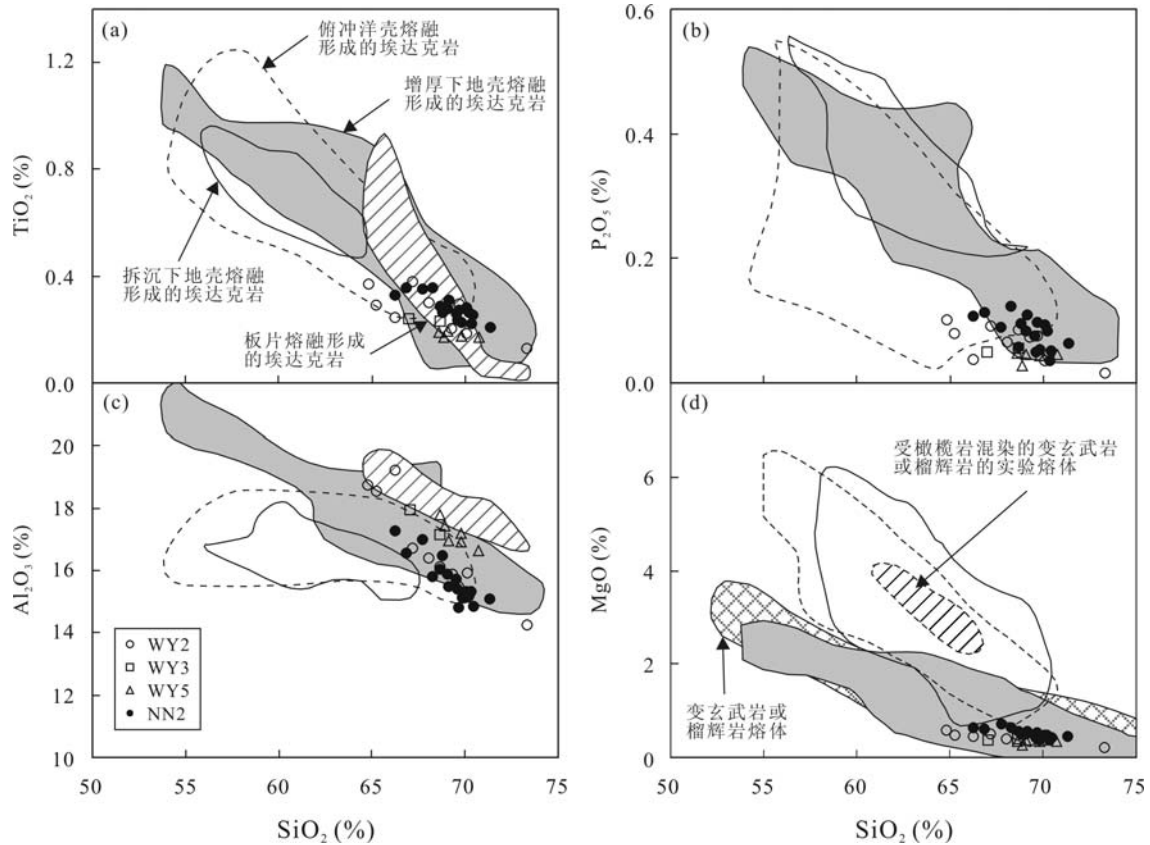


图 10 文峪和娘娘山花岗岩主微量元素与  $\text{SiO}_2$  图解(据文献[51,100,101], 样品符号同图 3)

Fig.10 Oxide, trace element and ratios vs.  $\text{SiO}_2$  plots of Wenyu and Niangniangshan granites (after references [51,100,101]. Symbols are the same as Fig.3)

薄转换的阶段。岩石圈减薄可以使地壳岩石因减压而熔融<sup>[86-87]</sup>, 此外还需要深部地幔物质或热源的供给, 才能形成大规模的岩浆活动<sup>[87-88]</sup>。关于深部热源促使加厚的下地壳物质熔融的机制, 近年来的研究表明主要有以下两种: 底侵的玄武岩或加厚下地壳(大于 40 km)基性岩石的部分熔融<sup>[89-95]</sup>和拆沉作用引起的下地壳玄武质岩石的部分熔融<sup>[96-98]</sup>。由于幔源岩浆底侵作用是岩浆从地壳底部直接向上运移的, 不与地幔橄榄岩发生交代, 不会引起 MgO 含量和  $\text{Mg}^\#$  值的升高<sup>[99]</sup>。而拆沉的榴辉岩板片进入软流圈地幔后被加热, 经部分熔融作用形成花岗质岩浆, 由于岩浆在上升途中必然要经过因上涌而覆盖在拆沉榴辉岩板片之上的地幔软流圈并与地幔橄榄岩发生混合, 会导致其 MgO 含量和  $\text{Mg}^\#$  值的增高<sup>[99]</sup>。文峪和娘娘山两个岩体具有较低的 MgO 含量(0.21%~0.73%)和  $\text{Mg}^\#$  值(27.6~39.0), 在主要氧化物和微量元素与  $\text{SiO}_2$  图解(图 10)中, 花岗岩体的成分点主要落入增厚下地壳熔融形成的埃达克质岩区域内, 与拆沉下地壳熔融形成的埃达克质岩差别较大。因此,

小秦岭地区的花岗岩体主要是幔源岩浆底侵促使下地壳部分熔融而形成的。

华北陆块南缘有若干同文峪和娘娘山岩体地球化学特征相似, 具有高 Sr/Y 比值和亏损重稀土元素特征的埃达克质花岗岩岩体, 其锆石 U-Pb 年龄介于 150~130 Ma 之间<sup>[13,102-104]</sup>, 这些花岗岩体被认为是增厚的玄武质下地壳部分熔融的产物, 但此时的构造环境已经不是挤压体制。文峪和娘娘山岩体侵位年龄为 135~139 Ma, 属于富钾的钙碱性二长花岗岩类, 形成于造山带造山作用结束后大陆板块从挤压向伸展转换的构造环境, 标志着厚的地壳伸展减薄的开始。根据成因分析, 文峪岩体晚期侵入的第 5 期侵入体为过铝质的高钾钙碱性花岗岩, 部分熔融深度较其他期次侵入体浅, 形成于厚的地壳向正常地壳厚度过渡或转变的环境。虽然没有第 5 期侵入体岩体的侵位年龄, 无法确定这一过渡或转变时期的具体时间, 但近期研究<sup>[104]</sup>发现位于华北陆块南缘的外方山地区合峪岩体具有与文峪岩体第 5 期侵入体相似的低 Sr 低 Y 的地球化学特征, 被认为形成



于中等压力下, 其侵位年龄为(148.2±2.5)~(135.3±4.9) Ma, 与文峪岩体年龄((135±7) Ma)相近, 因此认为由产生高 Sr 低 Y 的加厚的下地壳到产生低 Sr 低 Y 的加厚地壳向正常地壳过渡环境的转变发生在很短的时间内。

此外, 小秦岭地区普遍发育各种中生代岩脉, 岩脉主要为辉绿岩类及少量的煌斑岩类, 锆石测年结果主要集中在新太古代-古元古代(2658~2098 Ma 和 1982~1727 Ma)、新元古代(700~800 Ma)和晚古生代-中生代(274~127 Ma)<sup>[23]</sup>, 其中古老的年龄与文峪和娘娘山岩体中继承锆石年龄具有较好的对应。其早白垩世锆石年龄和部分岩脉侵入到文峪和娘娘山岩体中的地质接触关系表明, 岩脉是在早白垩世晚期, 在地壳伸展拉张的构造背景下侵位于古老结晶基底和花岗岩构造薄弱部位而形成的, 代表此时地壳已经强烈伸展减薄<sup>[87-88]</sup>。

从文峪和娘娘山岩体早期侵入体到晚期侵入体, 再到辉绿岩和煌斑岩脉的侵入, 反映了花岗岩浆活动的源区或岩浆房逐渐向浅部迁移, 岩浆源区由壳源向幔源演化, 及地壳从挤压加厚向伸展减薄转换的过程。这一地壳演化过程时限(139~127 Ma)与小秦岭变质核杂岩内糜棱状岩石及拆离伸展活动的时限为(135~123 Ma)<sup>[23,105]</sup>基本一致。前人通过构造、变形机制和热力学分析, 认为这些岩浆的侵位是伸展构造的起因之一, 即地壳增厚和岩浆上涌导致地壳的拉伸, 进而导致伸展构造的发生<sup>[106]</sup>, 文峪和娘娘山岩体是属于小秦岭变质核杂岩的重要组成部分。

## 7 结 论

(1) 锆石定年结果显示文峪和娘娘山黑云母二长花岗岩体形成时间分别为(135±7) Ma 和(139±4) Ma, 两个岩体是同一期构造-热事件的产物。

(2) 文峪和娘娘山花岗岩属于具有高硅、高铝、富碱、低镁特征的高钾钙碱性、准铝至过铝质花岗岩, 富集轻稀土, 亏损重稀土、Y、Yb。除文峪岩体第 5 期侵入体外, 两个岩体均具有弱 Eu 负异常到 Eu 正异常, 富集 Sr、Ba, 属于高 Sr 低 Yb 的埃达克质花岗岩, 源区残留石榴子石而无斜长石残留, 形成于压力较高的加厚下地壳。文峪晚期侵入的第 5 期侵入体具明显的 Eu 负异常, 中等的 Sr 含量, 表明源区除石榴子石外有斜长石残留, 形成于加厚地壳

向正常地壳减薄的环境。

(3) 锆石 Hf 同位素数据显示两个岩体新生锆石和继承锆石均来源于古元古代和新太古代地壳物质。其中文峪岩体物质来源以古元古代陆壳物质为主, 娘娘山岩体物质来源以新太古代陆壳为主。与太华杂岩解体的古元古代和新太古代两个部分时限相一致, 也与华北克拉通主要的地壳增长历史基本一致。

(4) 结合两岩体地球化学特征和区域地质演化历史, 认为文峪和娘娘山岩体形成于幔源岩浆底侵加热, 促使下地壳部分熔融。从早期侵入体到晚期侵入体, 反映了花岗岩岩浆活动的源区或岩浆房逐渐向浅部迁移, 构造环境挤压加厚向伸展减薄转换的过程。

徐勇航博士和陈伟博士在野外样品采集过程中给予了帮助; 两位审稿专家提出了宝贵的修改意见和建议, 在此谨表谢忱。

### 参考文献(References):

- [1] Hacker B R, Wang X, Eide E A, Ratschbacher L. Qinling-Dabie ultrahigh-pressure collisional orogeny [M]//Yin A, Harris T M. The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 345-370.
- [2] 翟明国, 从柏林. 苏鲁-大别山变质带岩石大地构造学[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3): 258-264.  
Zhai Mingguo, Cong Bolin. Petrotectonics of Sulu-Dabie metamorphic belt, Central and East China [J]. Sci China (D), 1996, 39(3): 319-328.
- [3] 殷鸿福, 张克信. 中央造山带的演化及其特点[J]. 地球科学, 1998, 23(5): 437-442.  
Yin Hong-fu, Zhang Ke-xing. Evolution and characteristics of the central orogenic belt [J]. Earth Sci, 1998, 23(5): 437-442 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-855.  
Zhang Guo-wei, Zhang Ben-ren, Yuan Xue-cheng, Xiao Qing-hui. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001: 421-722 (in Chinese).
- [5] Meng Qing-ren, Zhang Guo-wei. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China [J]. Tectonophysics, 2000, 323(3/4): 183-196.
- [6] Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, Webb L E, Grimmer J C, McWilliams M O, Ireland T, Dong Shu-wen, Hu Jian-ming. Tectonics of the Qinling (Central China): Tec-

- tonostratigraphy, geochronology, and deformation history [J]. *Tectonophysics*, 2003, 366(1/2): 1–53.
- [7] Chen Yan-jing, Pirajno F, Sui Ying-hui. Isotope geochemistry of the Tieluping silver-lead deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver-dominated deposits and related tectonic setting [J]. *Mineral Deposit*, 2004, 39(5/6): 560–575.
- [8] Chen Yan-jing, Pirajno F, Li Nuo, Guo Dong-sheng, Lai Yong. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling Orogen, Henan Province, China: Implications for ore genesis [J]. *Ore Geol Rev*, 2009, 35(2): 245–261.
- [9] Xu Yi-gang, Huang Xiao-long, Ma Jin-long, Wang Yan-bin, Iizuka Y, Xu Ji-feng, Wang Qiang, Wu Xiang-yang. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China Craton: Constraints from SHPIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2004, 147(6): 750–767.
- [10] Wu Fu-yuan, Lin Jing-qian, Wilde S A, Zhang Xiao-ou, Yang Jin-hui. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 233(1/2): 103–119.
- [11] 罗铭玖, 黎世美, 卢欣祥, 郑德琼, 苏振邦. 河南省主要矿产的成矿作用及矿床成矿系列[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1–355.
- Luo Ming-jiu, Li Shi-mei, Lu Xin-xiang, Zheng De-qiong, Su zhen-bang. The Main Mineral Mineralization and Metallogenic Series, Henan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1–335 (in Chinese).
- [12] 燕长海. 东秦岭铅锌银矿成矿系统内部结构[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1–144.
- Yan Chang-hai. The Internal Structure of Pb-Zn-Ag Ore-Forming System in the East Qinling Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1–144 (in Chinese).
- [13] 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 王义天. 大规模成矿作用与大型矿集区(上册)[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1–533.
- Mao Jing-wen, Hu Rui-zhong, Chen Yu-chuan, Wang Yi-tian. Large-Scale Ore-Forming Events and Large Ore Concentration Areas (vol. 1) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1–533 (in Chinese).
- [14] 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(1): 169–188.
- Mao Jing-wen, Xie Gui-qing, Zhang Zuo-heng, Li Xiao-feng, Wang Yi-tian, Zhang Chang-qing, Li Yong-feng. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2005, 21(1): 169–188 (in Chinese with English abstract).
- [15] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精确得到启示[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(4): 289–299.
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Wang Yitian, Yu Jinjie, Niu Baogui. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits [J]. *Sci China (D)*, 2003, 46(8): 838–851.
- [16] Mao Jing-wen, Xie Gui-qing, Pirajno F, Ye Hui-shou, Wang Yan-Bin, Li Yong-feng, Xiang Jun-feng, Zhao Hai-jie. Late Jurassic-Early Cretaceous granitoid magmatism in East Qinling, central-eastern China: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications [J]. *Aust J Earth Sci*, 2010, 57 (1): 51–78.
- [17] 晁援. 关于小秦岭金矿的成矿时代探讨[J]. *陕西地质*, 1989, 7(1): 52–56.
- Chao Yuan. The metallogenic epoch of the Xiaoqinling gold deposit [J]. *Geol Shaanxi*, 1989, 7(1): 52–56 (in Chinese with English abstract).
- [18] 栾世伟, 陈尚迪. 小秦岭金矿主要控矿因素及成矿模式 [J]. *地质找矿论丛*, 1990, 5(4): 1–14.
- Luan Shi-wei, Chen Shang-di. Main ore-controlling factors and metallogenic model of gold deposits in Xiaoqinling area [J]. *Contrib Geol Mineral Resour Res*, 1990, 5(4): 1–14 (in Chinese).
- [19] 李华芹, 刘家齐, 魏林. 热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 92–105.
- Li Hua-qin, Liu Jia-qi, Wei Lin. Fluid inclusion geochronology of hydrothermal deposits and its geological implication [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 92–105 (in Chinese).
- [20] 黎世美, 瞿伦全, 苏振邦, 黄建军, 王小生, 岳铮生. 小秦岭金矿地质和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 67–178.
- Li Shi-mei, Qu Lun-quan, Su Zhen-bang, Huang Jian-jun, Wang Xiao-sheng, Yue Zheng-sheng. Geology and Metallogenic Prediction of the Xiaoqinling Gold Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 67–178 (in Chinese).
- [21] 范宏瑞, 谢奕汉, 赵瑞, 王英兰. 小秦岭含金石英脉复式成因的流体包裹体证据[J]. *科学通报*, 2000, 45(5): 537–542
- Fan Hongrui, Xie Yihan, Zhao Rui, Wang Yinglan. Dual origins of Xiaoqinling gold-bearing quartz veins: Fluid inclusion evidences [J]. *Chinese Sci Bull*, 2000, 45(5): 537–542 (in Chinese).
- [22] Mao Jing-wen, Goldfarb R J, Zhang Zheng-wei, Xu Wen-yi, Qiu Yu-min, Deng Jun. Gold deposits in the Xiaoqinling-

- Xiong'ershan region, Qinling Mountains, central China [J]. Mineral Deposit, 2002, 37(3/4): 306-325.
- [23] 王义天, 叶会寿, 叶安旺, 帅云, 李永革, 张长青. 小秦岭文峪和娘娘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义 [J]. 地质科学, 2010, 45(1): 167-180.
- Wang Yi-tian, Ye Hui-shou, Ye An-wang, Shuai Yun, Li Yong-ge, Zhang Chang-qing. Zircon SHRIMP U-Pb ages and their significances of the Wenyu and Niangniangshan granitic plutons in the Xiaoqinling area, central China [J]. Chinese J Geol, 2010, 45(1): 167-180 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王团华, 毛景文, 王彦斌. 小秦岭-熊耳山地区岩墙锆石 SHRIMP 年代学研究——秦岭造山带岩石圈拆沉的证据 [J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1273-1287.
- Wang Tuan-hua, Mao Jing-wen, Wang Yan-bin. Research on SHRIMP U-Pb chronology in Xiaoqinling-Xiong'ershan area: The evidence of delamination of lithosphere in Qinling orogenic belt [J]. Acta Petrol Sinica, 2008, 24(6): 1273-1287 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王团华, 毛景文, 谢桂青, 叶安旺, 李宗彦. 小秦岭-熊耳山地区中基性岩墙的 Sr、Nd、Pb 同位素组成及其大地构造意义 [J]. 地质学报, 2008, 82(11): 1580-1591.
- Wang Tuan-hua, Mao Jing-wen, Xie Gui-qing, Ye An-wang, Li Zong-yan. Sr, Nd, Pb isotopic composition of the meso-basic dykes in the Xiaoqinling-Xiong'ershan Area, Henan Province, Central China and its tectonic significance [J]. Acta Geol Sinica, 2008, 82(11): 1580-1591 (in Chinese with English abstract).
- [26] Qi Liang, Hu Jing, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Talanta, 2000, 51(3): 507-513.
- [27] Wu Fu-yuan, Yang Yue-heng, Xie Lie-wen, Yang Jin-hui, Xu Ping. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. Chem Geol, 2006, 234(1/2): 105-126
- [28] 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 孙金凤, 吴福元. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定 [J]. 科学通报, 2008, 53(2): 220-228.
- Xie Liewen, Zhang Yanbin, Zhang Huihuang, Sun Jinfeng, Wu Fuyuan. Zircon/baddeleyite U-Pb and Lu-Hf isotope and trace element composition simultaneous *in situ* determination [J]. Chinese Sci Bull, 2008, 53(2): 220-228 (in Chinese).
- [29] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to *in situ* U-Pb zircon geochronology [J]. Chem Geol, 2004, 211(1/2): 47-69.
- [30] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. Chem Geol, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [31] Ludwig K R. User's manual for Isoplot/Ex version 2.49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [Z]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2001: 1-56.
- [32] Chu Nan-chin, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, German C R, Bayon G, Burton K. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections [J]. J Anal Atom Spectr, 2002, 17(12): 1567-1574.
- [33] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [M]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basin. Geological Society of London Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [34] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and compositional effects in variety of crustal magma types [J]. Earth Planet Sci Lett, 1983, 64(2): 295-304.
- [35] Jahn B M, Wu Fuyuan, Capdevila R, Martineau F, Zhao Zhenhua, Wang Yixian. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China [J]. Lithos, 2001, 59(4): 171-198.
- [36] 张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2006, 22(9): 2249-2269.
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Cheng-dong, Wang Yuan-long, Jin Wei-jun, Jia Xiu-qin. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications [J]. Acta Petrol Sinica, 2006, 22(9): 2249-2269 (in Chinese with English abstract).
- [37] Gao Shan, Luo Ting-chuan, Zhang Ben-ren, Zhang Hong-fei, Han Yin-wen, Zhao Zi-dan, Hu Yi-ken. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1998, 62(11): 1959-1975.
- [38] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. Rev Geophys, 1995, 33(2): 241-265.
- [39] Xiong Xiao-lin, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis [J]. Chem Geol, 2005, 218(3/4): 339-359.
- [40] Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, Isachsen C E. The  $^{176}\text{Lu}$  decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions [J]. Earth Planet Sci Lett, 2004, 219(3/4): 311-324.
- [41] Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry

- of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148(1/2): 243–258.
- [42] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Achterbrgh E V, O'Reilly S Y, Shee S R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analyses of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- [43] Vervoort J D, Pachett P J, Gehrels G E, Nutman A P. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes [J]. *Nature*, 1996, 379(6566): 624–627.
- [44] Kemp A I S, Wormald R J, Whitehouse M J, Price R C. Hf isotopes in zircon reveal contrasting sources and crystallization histories for alkaline to peralkaline granites of Temora, southeastern Australia [J]. *Geology*, 2005, 33(10): 797–800.
- [45] Yang Jin-hui, Wu Fu-yuan, Wilde S A, Xie Lie-wen, Yang Yue-heng, Liu Xiao-ming. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2007, 153(2): 177–190.
- [46] Li Xian-hua, Li Zheng-xiang, Li Wu-xian, Liu Ying, Yuan Chao, Wei Gang-jian, Qi Chang-shi. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J]. *Lithos*, 2007, 96(1/2): 186–204.
- [47] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some moder arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662–665.
- [48] Drummond M S, Defant M J, Kepezhinskas P K. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas [J]. *Trans Roy Soc Edinb Earth Sci*, 1996, 87(1/2): 205–215.
- [49] Qin Jiang-feng, Lai Shao-cong, DiWu Chun-rong, Ju Yin-juan, Li Yong-fei. 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 [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2010, 159(3): 389–409.
- [50] Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Charnpion D. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution [J]. *Lithos*, 2005, 79(1/2): 1–24.
- [51] Moyen J F. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the “adakitic signature” [J]. *Lithos*, 2009, 112(3/4): 556–574.
- [52] Wyborn D, Chappell B W, James M. Examples of convective fractionation in high temperature granites from the Lachlan Fold Belt [J]. *Aust J Earth Sci*, 2001, 48(4): 531–541.
- [53] Iyer H M, Evans J R, Dawson P B, Stauber D A, Achauer U. Differences in magma storage in different volcanic environments as revealed by seismic tomography: Silicic volcanic centers and subduction-related volcanoes [M]//Ryan M P. *Magma Transport and Storage*. Chichester (United Kingdom): John Wiley, 1990: 293–316.
- [54] Schilling F R, Partzsch G M. Quantifying partial melt fraction in the crust beneath the Central Andes and the Tibetan Plateau [J]. *Phys Chem Earth A*, 2001, 26(4/5): 239–246.
- [55] Harrison T M, Clarke G K C. A model of igneous intrusion and uplift as applied to Quotoon pluton, British Columbia [J]. *Can J Earth Sci*, 1979, 16(3): 411–420.
- [56] Coleman D S, Gray W, Glazner A F. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne intrusive suite, California [J]. *Geology*, 2004, 32(5): 433–436.
- [57] McNulty B A, Tong Wei-xing, Tobisch O T. Assembly of a dike-fed magma chamber: The Jackass Lakes pluton, central Sierra Nevada, California [J]. *Geol Soc Am Bull*, 1996, 108(8): 926–940.
- [58] Mahan K H, Bartley J M, Coleman D S, Glazner A F, Carl B S. Sheeted intrusion of the synkinematic McDoogle Pluton, Sierra Nevada, California [J]. *Geol Soc Am Bull*, 2003, 115(12): 1570–1582.
- [59] Rushmer T. Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1991, 107(1): 41–59.
- [60] Beard J S, Lofgren G E. Dehydration melting and watersaturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1.3 and 6.9 kbar [J]. *J Petrol*, 1991, 32(2): 365–401.
- [61] Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: The effects of temperature and time [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1994, 115(4): 369–383.
- [62] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling [J]. *J Petrol*, 1995, 36(4): 891–931.
- [63] Zhao Guo-chun, Wilde S A, Cawood P A, Sun Min. Archean blocks and their boundaries in the North China craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution[J]. *Precamb Res*, 2001, 107(1/2): 45–73
- [64] Gao Shan, Rudnick R L, Yuan Hong-ling, Liu Xiao-ming, Liu Yong-sheng, Xu Wen-liang, Ling Wen-li, Ayers J, Wang Xuan-che, Wang Qing-hai. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature*, 2004, 432(7019): 892–897.
- [65] Xu Wen-liang, Gao Shan, Wang Qing-hai, Wang Dong-yan, Liu Yong-sheng. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications [J]. *Geology*, 2006, 34(9): 721–724.

- [66] Keay S, Steele D, Compston W. Identifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: An application to the Lachlan foldbelt [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 137(4): 323–341.
- [67] 河南省地质矿产局. 河南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1–345.  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province. *Regional Geology of Henan Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1–345 (in Chinese).
- [68] 沈宝丰, 骆辉, 李双保, 李俊健, 彭晓亮, 胡小蝶, 毛德宝, 梁若馨. 华北陆台太古宙绿岩带地质与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1–202.  
Shen Bao-feng, Luo Hui, Li Shuang-bao, Li Jun-jian, Peng Xiao-liang, Hu Xiao-die, Mao De-bao, Liang Ruo-xin. *Geology and Mineralization of Archean Greenstone Zone in North China Craton* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1–201 (in Chinese).
- [69] Kröner A, Compston W, Zhang Guo-wei, Guo An-lin, Todt W. Age and tectonic setting of late Archean greenstone-gneisses terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating [J]. *Geology*, 1988, 16(3): 211–215.
- [70] 薛良伟, 原振雷, 张荫树, 强立志. 鲁山太华群 Sm-Nd 同位素年龄及其意义[J]. *地球化学*, 1995, 24(增刊): 92–97.  
Xue Liang-wei, Yuan Zhen-lei, Zhang Yin-shu, Qiang Li-zhi. The Sm-Nd isotope age of Taihua Group in the Lushan area and their implications [J]. *Geochemica*, 1995, 24(suppl): 92–97 (in Chinese with English abstract).
- [71] Sun Yong, Yu Zai-ping, Kröner A. Geochemistry and single zircon geochronology of Archean TTG gneisses in the Taihua high-grade terrain, Lushan area, central China [J]. *J Southeast Asian Earth Sci*, 1994, 10(3/4): 227–233.
- [72] 周汉文, 钟增球, 凌文黎, 钟国楼, 徐启东. 豫西小秦岭地区太华杂岩斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. *地球化学*, 1998, 27(4): 367–372.  
Zhou Han-wen, Zhong Zeng-qiu, Ling Wen-li, Zhong Guo-lou, Xu Qi-dong. Sm-Nd isochron for the amphibolites within Taihua complex from Xiao Qinling area, western Henan and its geological implications [J]. *Geochimica*, 1998, 27(4): 367–372 (in Chinese with English abstract).
- [73] 胡受奚, 林潜龙. 华北与华南古板块拼合带地质与找矿[M]. 南京: 南京大学出版社, 1989: 1–558.  
Hu Shou-xi, Lin Qian-long. *Geology and Prospecting on the Collided Zone between North China Paleo-Plate and South China Paleo-Plate* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1989: 1–558 (in Chinese).
- [74] 沈富农. 河南鲁山太华群不整合的发现和地层层序厘定[J]. *中国区域地质*, 1994, 13(2): 135–140, 147.  
Shen Fu-nong. The discovery of unconformity within the Taihua Group and definition of its stratigraphic sequence in the Lushan area, Henan [J]. *Reg Geol China*, 1994, 13(2): 135–140, 147 (in Chinese with English abstract).
- [75] 涂绍雄. 河南鲁山太华变质杂岩原岩建造及时代二分的新认识[J]. *华南地质与矿产*, 1996, 12(4): 135–140  
Tu Shao-xiong. A new idea on the protolith formations and the dismembering into two eras of Taihua metamorphic complex in lushan region, Henan Province [J]. *Geol Mineral Resour South China*, 1996, 12(4): 135–140 (in Chinese with English abstract).
- [76] 杨长秀, 王世炎, 刘振宏, 雷正化, 杨长青. 河南鲁山地区中-新太古代灰色片麻岩[J]. *地质论评*, 2008, 54(3): 327–334.  
Yang Chang-xiu, Wang Shi-yan, Liu Zhen-hong, Lei Zheng-hua, Yang Chang-qing. Mesoarchean-Neoproterozoic Grey Gneiss in the Lushan Area, Henan Province [J]. *Geological Review*, 2008, 54(3): 327–334 (in Chinese with English abstract).
- [77] 丁莲芳. 对豫西小秦岭太华群的重新认识[J]. *西安工程学院学报*, 1996, 18(4): 1–8.  
Ding Lian-fang. New recognition to group Taihua in the mountain small qinling in the west of Henan Province [J]. *J Xi'an Colleg Geol*, 1996, 18(4): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [78] 张国伟, 郭安林, 刘福田, 肖庆辉, 孟庆任. 秦岭造山带三维结构及其动力学分析[J]. *中国科学(D 辑)*, 1996, 26(增刊): 1–6.  
Zhang Guowei, Guo Anlin, Liu Futian, Xiao Qinghui, Meng Qingren. Three-dimensional architecture and dynamic analysis of the Qinling Orogenic Belt [J]. *Sci China (D)*, 1996, 39(suppl): 1–9.
- [79] 王清晨, 孙枢, 李继亮, 周达, 许靖华, 张国伟. 秦岭的大地构造演化[J]. *地质科学*, 1989 (2): 129–142.  
Wang Qing-chen, Sun Shu, Li Ji-liang, Zhou Da, Xu Jing-hua, Zhang Guo-wei. The tectonic evolution of the Qinling Mountain belt [J]. *Chinese J Geol*, 1989 (2): 129–142 (in Chinese).
- [80] 陈海泓, 侯泉林, 肖文交. 中国碰撞造山带研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1999: 224–232.  
Chen Hai-hong, Hou Quan-lin, Xiao Wen-jiao. *Collision Orogenic Belts of China* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1999: 224–232 (in Chinese).
- [81] 任纪舜. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征[J]. *中国区域地质*, 1991, 10(4): 289–293.  
Ren Ji-shun. The basic characteristics of the tectonic evolu-

- tion of the continental lithosphere in China [J]. *Reg Geol China*, 1991, 10(4): 289–293 (in Chinese).
- [82] 赵越, 杨振宇, 马醒华. 东亚大地构造发展的重要转折[J]. *地质科学*, 1994, 29(2): 105–119.  
Zhao Yue, Yang Zhen-yu, Ma Xing-hua. Geotectonic transition from paleoasian system and paleotethyan system to paleopacific active continental margin in eastern Asia [J]. *Sci Geol Sinica*, 1994, 29(2): 105–119 (in Chinese with English abstract).
- [83] 卢欣祥. 秦岭花岗岩揭示的秦岭构造演化过程——秦岭花岗岩研究进展[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(2): 213–214.  
Lu Xin-xiang. The evolutional process of Qinling tectonics revealed by Qinling granite — Advance in study on Qinling granite [J]. *Adv Earth Sci*, 1998, 13(2): 213–214 (in Chinese).
- [84] 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. *长春科技大学学报*, 1999, 29(4): 313–318.  
Wu Fu-yuan, Sun De-you. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China [J]. *J Changchun Univ Sci Technol*, 1999, 29(4): 313–318 (in Chinese with English abstract).
- [85] 吴福元, 孙德有, 张广良, 任向文. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 379–388.  
Wu Fu-yuan, Sun De-you, Zhang Guang-liang, Ren Xiang-wen. Deep geodynamics of Yanshain Movement [J]. *Geol J China Univ*, 2000, 6(3): 379–388 (in Chinese with English abstract).
- [86] Bird P. Initiation of intracontinental subduction in the Himalaya [J]. *J Geophys Res*, 1978, 83(B10): 4975–4987.
- [87] Syverster P J. Post-collisional strongly Peraluminous granites [J]. *Lithos*, 1998, 45(1–4): 29–44.
- [88] Roberts M P, Clements J D. Origin of high-potassium, talc-alkaline, I-type granitoids [J]. *Geology*, 1993, 21(9): 825–828.
- [89] Muir R J, Weaver S D, Bradshaw J D, Eby G N, Evans J A. The Cretaceous Separation Point batholith, New Zealand: Granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere [J]. *J Geol Soc*, 1995, 152(4): 689–701.
- [90] Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca batholith, Peru [J]. *J Petrol*, 1996, 37(6): 1491–1521
- [91] Kay R W, Kay S M. Andean adakites: Three ways to make them [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2002, 18(3): 303–311.
- [92] Kay S M, Mpodozis C. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust [J]. *GSA Today*, 2001, 11(3): 4–9.
- [93] Fan Wei-ming, Guo Feng, Wang Yue-jun, Lin Ge, Zhang Ming. Post-orogenic bimodal volcanism along the Sulu orogenic belt in eastern China [J]. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26(9/10): 733–746.
- [94] Zhang Hong-fu, Sun Min, Zhou Xin-hua, Fan Wei-ming, Zhai Ming-guo, Yin Ji-feng. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major, trace element, and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 144(2): 241–253.
- [95] 路凤香, 郑建平, 邵济安, 张瑞生, 陈美华, 余淳梅. 华北东部中生代晚期-新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. *地质前缘*, 2006, 13(2): 86–92.  
Lu Feng-xiang, Zheng Jian-ping, Shao Ji-an, Zhang Rui-sheng, Chen Mei-hua, Yu Chun-mei. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China [J]. *Earth Sci Front*, 2006, 13(2): 86–92 (in Chinese with English abstract).
- [96] Defant M J, Xu Ji-feng, Wang Qiang, Xiao Long, Kepezhinskas P, Zhang Qi. Adakites: Some variations on a theme [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2002, 18(2): 129–142.
- [97] 吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. *地质前缘*, 2003, 10(3): 51–60.  
Wu Fu-yuan, Ge Wen-chun, Sun De-you, Guo Chun-li. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China [J]. *Earth Sci Front*, 2003, 10(3): 51–60 (in Chinese with English abstract).
- [98] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 罗照华, 杜杨松. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”——东亚型大陆动力学模式研究计划[J]. *现代地质*, 1994, 8(3): 349–356.  
Deng Jin-fu, Mo Xuan-xue. Lithosphere root/de-rooting and activation of the east China continent [J]. *Geoscience*, 1994, 8(3): 349–356 (in Chinese with English abstract).
- [99] 许继峰, 王强. Adakite 火成岩对大陆地壳增厚过程的指示: 以青藏北部火山岩为例[J]. *地质前缘*, 2003, 10(4): 401–406.  
Xu Ji-feng, Wang Qiang. Tracing the thickening process of continental crust through studying adakitic rocks: Evidence from volcanic rocks in the north Tibet [J]. *Earth Sci Front*, 2003, 10(4): 401–406 (in Chinese with English abstract).
- [100] Wang Qiang, Wyman D A, Xu Ji-feng, Zhao Zhen-hua, Jian Ping, Zi Feng. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization [J]. *J Geol*, 2007, 115(2): 149–161.
- [101] Wang Qiang, Wyman D A, Xu Ji-feng, Zhao Zhen-hua, Jian Ping, Xiong Xiao-lin, Bao Zhi-wei, Li Chao-feng, Bai Zheng-hua. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization [J]. *Lithos*, 2006, 89(3/4): 424–446.
- [102] 周红升, 马昌前, 张超, 陈玲, 张金阳, 余振兵. 华北克拉通南缘泌阳春水燕山期铝质 A 型花岗岩类: 年代学、地球化学及其启示[J]. *岩石学报*, 2008, 24(1): 49–64.

- Zhou Hong-sheng, Ma Chang-qian, Zhang Chao, Chen Ling, Zhang Jin-yang, She Zhen-bing. Yanshanian aluminous A-type granitoids in the Chunshui of Biyang, south margin of North China Craton: Implications from petrology, geochronology and geochemistry [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2008, 24(1): 49-64 (in Chinese with English abstract).
- [103] 郭波, 朱赖民, 李犇, 弓虎军, 王建其. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(2): 265-281.
- Guo Bo, Zhu Lai-min, Li Ben, Gong Hu-jun, Wang Jian-qi. Zircon U-Pb age and Hf isotope composition of the Huashan and Heyu granite plutons at the southern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2009, 25(2): 265-281 (in Chinese with English abstract).
- [104] 高昕宇, 赵太平, 原振雷, 周艳艳, 高剑峰. 华北陆块南缘中生代合峪花岗岩的地球化学特征与成因 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(12): 3485-3506.
- Gao Xin-yu, Zhao Tai-ping, Yuan Zhen-lei, Zhou Yan-yan, Gao Jian-feng. Geochemistry and petrogenesis of the Heyu batholith in the southern margin of the North China Block [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2010, 26(12): 3485-3506 (in Chinese with English abstract).
- [105] 张进江, 郑亚东, 刘树文. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化[M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 17-63.
- Zhang Jin-jiang, Zheng Ya-dong, Liu Shu-wen. The Xiaoqinling Metamorphic Core Complex: Structure, Genetic Mechanism and Evolution [M]. Beijing: China Ocean Press, 1998: 17-63 (in Chinese).
- [106] 张进江, 郑亚东, 刘树文. 小秦岭金矿田中生代构造演化与矿床形成[J]. *地质科学*, 2003, 38(1): 74-84.
- Zhang Jin-jiang, Zheng Ya-dong, Liu Shu-wen. Mesozoic tectonic evolution and ore-deposits formation in the gold mine field of Xiaoqinling [J]. *Chinese J Geol*, 2003, 38(1): 74-84 (in Chinese with English abstract).