河北承德甲山正长岩成因的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素制约

刘 源[1], 江思宏[2], 陈春良[2,3], 韩 宁[2]

(1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘 要: 报道了华北克拉通北缘承德地区甲山正长岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素、主微量元素、Sr-Nd-Pb 同位素组成。甲山岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 111~108 Ma, 代表岩体的结晶年龄, 表明其侵位于早白垩世晚期。岩体高 SiO_2、K_2O+Na_2O、Al_2O_3、LILEs(Rb、K)和 LREE, 低 $Fe_2O_3^T$、CaO、TiO_2、MgO 和 HFSE, 具有板内裂谷岩浆岩的特征, 属 A 型花岗岩。甲山岩体 $\varepsilon Nd(t)=-5.0\sim-0.9$, $t_{DM2(Nd)}=0.98\sim1.31$ Ga; $\varepsilon Hf(t)=-2.7\sim+4.3$, $t_{DM2(Hf)}=0.90\sim1.33$ Ga; $\Delta8/4=84.9\sim91.3$, $\Delta7/4=-6.4\sim-4.0$, $(^{206}Pb/^{204}Pb)_i=16.63\sim17.10$, $(^{207}Pb/^{204}Pb)_i=15.24\sim15.30$, $(^{208}Pb/^{204}Pb)_i=36.54\sim37.20$。根据野外地质观察、实验岩石学以及元素地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素示踪的综合分析, 认为甲山岩体可能起源于下地壳与亏损地幔的混合源区, 是华北克拉通北缘岩石圈强烈减薄、地壳伸展作用的结果。早白垩世甲山岩体形成过程中亏损地幔物质的参与指示了华北克拉通北缘岩石圈减薄和软流圈地幔上涌, 记录了陆内伸展环境下与软流圈底侵作用相关的岩浆事件。

关键词: 正长岩; 早白垩世; 下地壳; 亏损地幔; 甲山岩体; 华北克拉通

中图分类号: P588.12+2; P597 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-6524(2015)01-0014-21

Petrogenesis of the Jiashan syenite in Chengde, Hebei Province: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic evidence

LIU Yuan[1], JIANG Si-hong[2], CHEN Chun-liang[2,3] and HAN Ning[2]

(1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeney and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and Hf isotopic data, major and trace elements and Sr-Nd-Pb isotopic compositions are presented in this paper for the Jiashan syenite intrusive on the northern margin of the North China Craton. The Jiashan syenite intrusive was emplaced at 111~108 Ma in the Early Cretaceous period. The pluton has high SiO_2, K_2O+Na_2O, Al_2O_3, LILEs (Rb, K) and LREE but low $Fe_2O_3^T$, CaO, TiO_2, MgO and HFSE, with no Nb and Ta anomalies, suggesting intracontinental rift volcanic rocks that belong to the A-type granite. $\varepsilon Nd(t)=-5.0\sim-0.9$, $t_{DM2(Nd)}=0.98\sim1.31$ Ga, $\varepsilon Hf(t)=-2.7\sim+4.3$, $t_{DM2(Hf)}=0.90\sim1.33$ Ga, $\Delta8/4=84.9\sim91.3$, $\Delta7/4=-6.4\sim-4.0$, $(^{206}Pb/^{204}Pb)_i=16.63\sim17.10$, $(^{207}Pb/^{204}Pb)_i=15.24\sim15.30$, and $(^{208}Pb/^{204}Pb)_i=36.54\sim37.20$. According to the comprehensive analysis of the geological field observation, experimental petrology, trace element geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes, the authors hold that the Jiashan pluton was derived from the mixed source of the lower crust and the depleted mantle, and

收稿日期: 2014-05-08; **修订日期**: 2014-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41030421, 41273061)

作者简介: 刘 源(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事岩石学研究, E-mail: liuyuandxy@163.com; 通讯作者: 江思宏(1968-), 男, 研究员, 主要从事金属矿床成矿规律研究, E-mail: jiangsihong1@163.com。

www.yskw.ac.cn

resulted from the crustal extension and the lithosphere thinning of the NCC. The involvement of the depleted mantle during the formation of the Early Cretaceous Jiashan syenite intrusive indicates the lithospheric thinning on the northern margin of the North China Craton and the upwelling of the asthenosphere mantle, which recorded the magmatic events related to the asthenosphere underplating in a continental extensional environment.

Key words: syenite; Early Cretaceous; lower crust; depleted mantle; Jiashan pluton; North China Craton

华北克拉通东部遭受了强烈的克拉通破坏，有大于 100 km 的岩石圈发生了减薄，并且岩石圈地幔的性质发生了改变，即由古老的、耐熔的、冷的岩石圈地幔转变为年轻的、富集的、热的新生岩石圈地幔（Fan and Menzies，1992；Menzies *et al*.，1993；Zheng，1999；Gao *et al*.，2002；Zhang *et al*.，2004，2007；杨进辉等，2008）。岩浆活动中地幔物质的加入被认为是克拉通破坏的一种表现（Xu *et al*.，2009），克拉通破坏的最显著变化是岩浆源区从富集岩石圈地幔到亏损软流圈地幔的转变（Menzies *et al*.，2007；Yang *et al*.，2007；Wu *et al*.，2008；Xu *et al*.，2009）。因此，岩石圈减薄和火成岩活动之间的关系，特别是软流圈地幔来源的岩浆活动，提供了一个限定克拉通破坏的时间、空间及地球动力学机制的方法（Wu *et al*.，2008；Yang and Wu，2009）。

华北克拉通东部广泛发育着一期早白垩世 A 型花岗岩，前人对这期 A 型花岗岩及相伴生的碱性岩做了大量的年代学、岩石学和地球化学工作，并取得显著的研究成果（许保良等，1994，1998；Wei *et al*.，2002；Wu *et al*.，2005；Yang *et al*.，2007）。甲山岩体为华北克拉通北缘燕山晚期岩浆活动产物，杨富全等（1997，2003，2005）将甲山岩体划分为 3 个单元，报道了其主微量元素及 Sr-Nd 同位素特征，认为该岩体形成于造山晚期的岩石圈伸展环境下，为富集的大陆岩石圈地幔部分熔融形成，与地幔上涌有关。本文认为甲山岩体的形成与亏损地幔有关，因此重新测试了甲山岩体的岩石地球化学及 Sr-Nd 同位素数据，并增加报道了岩体 3 个相带 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素和全岩 Pb 同位素数据，目的在于重新厘定甲山正长岩的成因，探讨其动力学背景。

1　地质背景

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一，广泛发育岩浆活动与金属成矿作用（Liu *et al*.，1992）（图 1a）。华北克拉通北缘北侧以康保-围场断裂与古亚洲洋构造域相接，南侧以崇礼-赤城-承德深大断裂与华北克拉通古陆块相连，大地构造位置十分重要（田伟等，2007）。华北克拉通北缘的古蒙古洋在经历了一系列复杂的构造-岩浆演化之后，于 250 Ma 前后最终沿索伦缝合带闭合消失（Chen *et al*.，2000），随后华北克拉通北缘进入伸展阶段，形成了大面积的中生代侵入岩和火山岩。近年来，精细的年代学研究表明，该区侵入岩可划分为 3 期，它们分别形成于三叠纪（231～210 Ma）、侏罗纪（180～153 Ma）和早白垩世（135～110 Ma），其中以早白垩世侵入岩分布最广，岩性最为复杂多样（杨进辉等，2009）。位于华北地台北缘承德向斜西南翼的甲山正长岩体（图 1b）就是于早白垩世侵位于下侏罗统南大岭组及中侏罗统髫髻山期次安山岩中（图 1c），是区域上众多同期 A 型花岗岩的典型代表，被认为是华北克拉通破坏和岩石圈减薄的产物（孙金凤等，2009）。

2　岩体地质特征及样品采集

甲山岩体出露于河北省承德县甲山镇附近，岩体南北长 5 km，东西最宽 3.8 km，平面上为不规则椭圆形，出露面积约 14 km^2，由 3 个同心分布单元组成（图 1c），从外到内依次为中粗粒含角闪辉石正长岩、粗粒辉石角闪石英正长岩、中细粒似斑状含辉石角闪石英正长岩，三者之间呈涌动型侵入接触关系。其中含辉石角闪石英正长岩中含有大量包体，大小一般在 1～3 cm，最大可达 30 cm，岩性为角闪辉石石英二长闪长岩（杨富全等，2003）。样品 JS11-1 的地理位置为 N40°49′7.1″，E118°18′1.7″；JS11-2 在 JS11-1 西 30 m 处；JS11-3 的地理位置为 N40°49′8.1″，E118°18′17.4″；JS11-4 的地理位置为 N40°49′2.2″，E118°17′41.6″。

岩体最外侧的中粗粒含角闪辉石正长岩（JS11-3，图 2a、2c）具块状构造，主要矿物成分为钾长石（约 70％）、普通角闪石（约 7％）、单斜辉石（约 6％）、斜

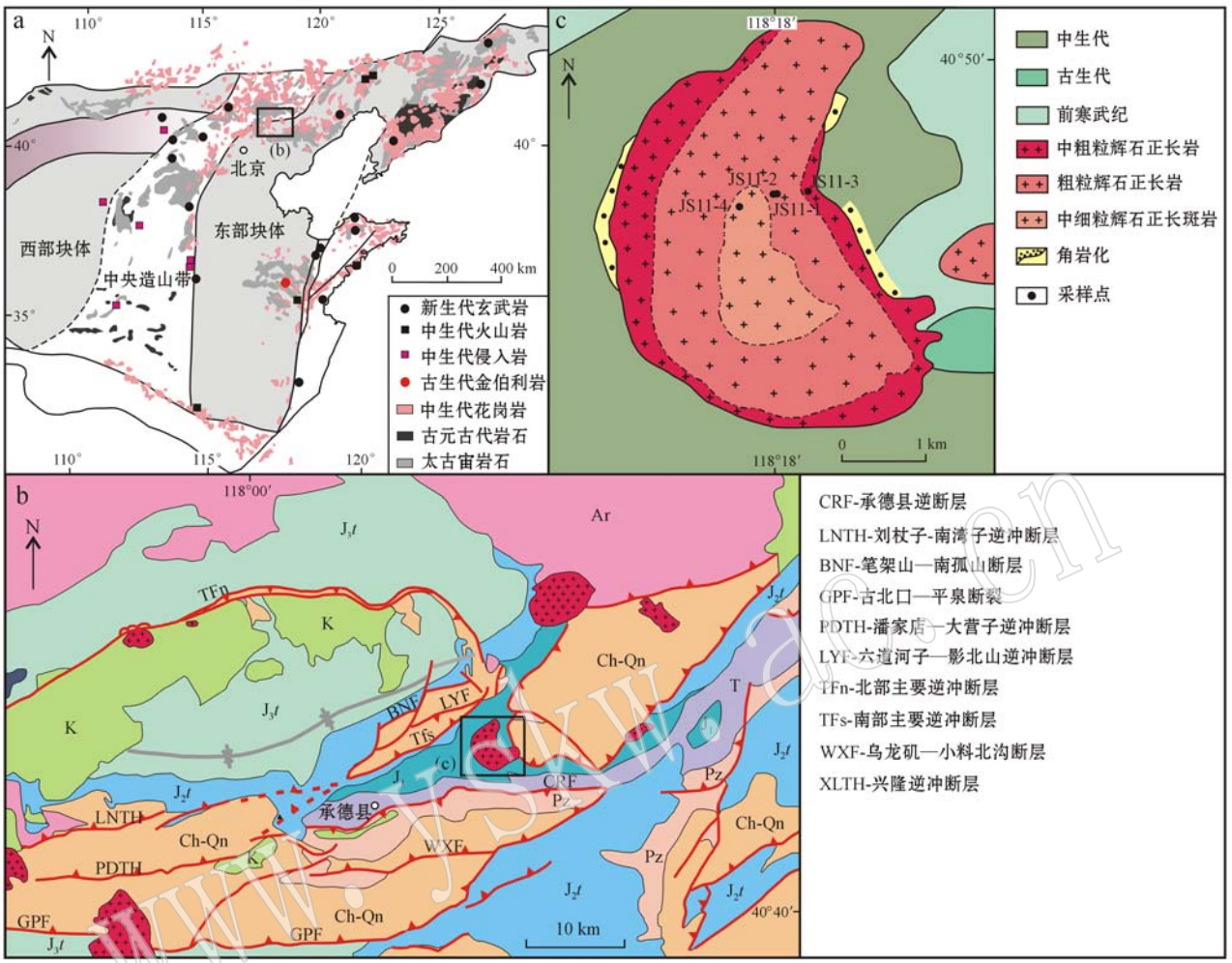


图 1 华北克拉通东部地质图(a,据 Zhao 等,2000,2008)、燕山中部承德-宽城一带地质构造简图(b,据张长厚等,2012)和甲山岩体地质简图(c,改编自杨富全等,2005)

Fig. 1 Geological map of the eastern North China Craton (a, after Zhao *et al*., 2000, 2008), tectonic sketch map around Chengde City and Kuancheng County, Central Yanshan Depression Belt (b, after Zhang Changhou *et al*., 2012) and geological sketch map of the Jiashan pluton (c, after Yang Fuquan *et al*., 2005)

长石(约 5%)、石英(<5%),副矿物为磁铁矿、锆石、磷灰石等。分布在岩体内侧、出露面积最大的粗粒辉石角闪石英正长岩(JS11-1、JS11-2,图 2d、2e、2f)具块状构造,主要矿物成分为条纹长石(约 70%)、普通角闪石(约 8%)、单斜辉石(约 5%)、斜长石(约 3%)、石英(6%),副矿物为磁铁矿、锆石等。出露于岩体中心的中细粒似斑状含辉石角闪石英正长岩(JS11-4,图 2b)具块状构造,斑晶(约 30%)大部分为钾长石,粒径 2~10 mm,少量斜长石和单斜辉石,基质具中细粒半自形粒状结构,主要为钾长石(约 50%)、角闪石(约 10%)、石英(约 8%)、单斜辉石(约 6%)、斜长石(约 5%)。

3 分析方法

本文 4 件样品分析了主量、微量元素、Sr-Nd-Pb 同位素,其中 JS11-1、JS11-3 和 JS11-4 还进行了锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年及 Hf 同位素原位分析。

全岩的主元素和微量元素在核工业地质分析测试研究中心完成,主元素采用 X 荧光光谱仪分析,微量元素分析采用 ICP-MS 分析,测试精度:Fe_2O_3 的 RSD<10%,其它元素的 RSD<2%~8%,微量和稀土元素的 RSD<10%。

用于 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和 Hf 同

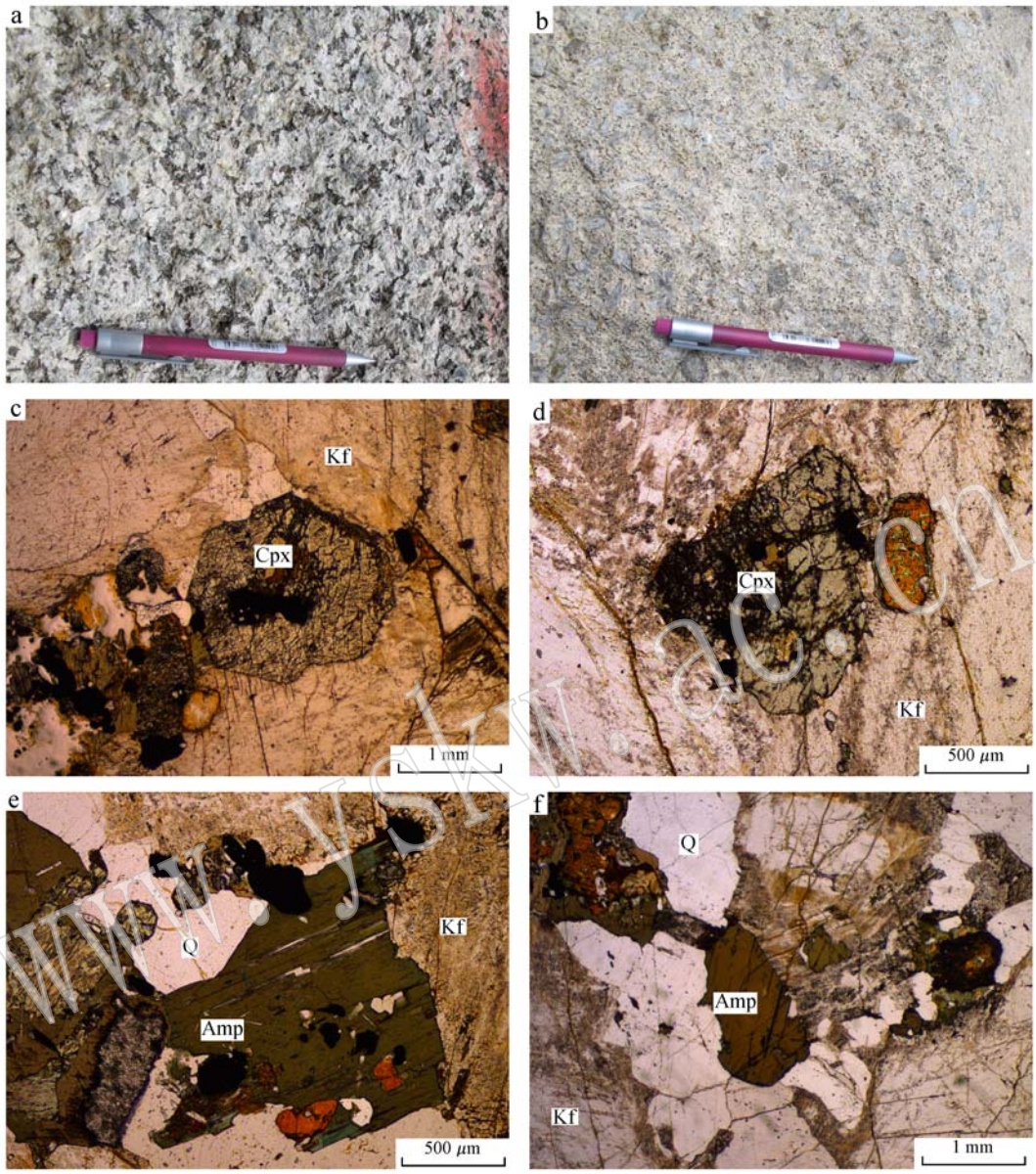


图 2　甲山岩体野外照片及镜下显微照片

Fig. 2　Representative outcrop photographs and photomicrographs of the Jiashan pluton

a—中粗粒辉石正长岩(JS11-3)；b—中细粒似斑状正长岩(JS11-4)；c—中粗粒辉石正长岩中粗粒钾长石中包裹的单斜辉石(JS11-3)，单偏光；d—粗粒辉石角闪石英正长岩中包裹在单个钾长石内的单斜辉石(JS11-1)，单偏光；e—粗粒辉石角闪石英正长岩(JS11-2)，单偏光；f—粗粒辉石角闪石英正长岩(JS11-1)，单偏光；Cpx—单斜辉石；Amp—角闪石；Kf—钾长石；Q—石英

a—medium- to coarse-grained pyroxene syenite (JS11-3)；b—fine-grained porphyritic syenite (JS11-4)；c—clinopyroxene enveloped by coarse-grained K-feldspar in the medium- to coarse-grained pyroxene syenite (JS11-3)；d—clinopyroxene enveloped by K-feldspar in coarse-grained pyroxene amphibole quartz syenite (JS11-1)；e—coarse-grained pyroxene amphibole quartz syenite (JS11-2)；f—coarse-grained pyroxene amphibole quartz syenite；Cpx—clinopyroxene；Amp—amphibole；Kf—K-feldspar；Q—quartz

位素分析的锆石样品挑选是由廊坊所科大岩石矿物分选技术服务公司完成的。将挑选出颗粒较好的锆石用环氧树脂固定，待环氧树脂充分固化后抛光至锆石露出核部，然后进行锆石的阴极发光(CL)和电子相分析。锆石 LA-MC-ICP-MS 测年在中国地质科学院矿产资源研究所 LA-MC-ICP-MS 实验室完成，锆石定年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统，激光剥蚀斑束直径为 25 μm，频率为 10 Hz，能量密度约为 2.5 J/cm^2，以 He 为载气。采用单点剥蚀的方法，利用锆石 GJ-1 将仪器调到最优状态。锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标，U、Th 含

www.yskw.ac.cn

量以锆石M127(U=923×10^{-6},Th = 439×10^{-6},Th/U=0.475)(Nasdala *et al*., 2008)为外标进行校正。测试过程中每测5~7个样品用2个锆石标样GJ1进行校正,并测量1个锆石Plešovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。测量过程中绝大多数分析点$^{206}Pb/^{204}Pb$>1 000,为进行普通铅校正,用离子计数器检测^{204}Pb,^{204}Pb含量异常高的分析点可能受包体普通Pb的影响,对这种分析点在计算时剔除。数据处理采用ICPMSDataCal4.3程序(Liu *et al*., 2008),锆石年龄谐和图用Isoplot 2.49程序获得(Ludwig, 2001a, 2001b),详细实验测试过程参见侯可军等(2009)。本次样品分析过程中,Plešovice标样作为未知样品的分析结果为337.1±1.8 Ma(n=4,2σ),对应的年龄推荐值为337.13±0.37 Ma(2σ)(Sláma *et al*., 2008),两者在误差范围内完全一致。

锆石原位Hf同位素分析测试在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室的Newwave UP213紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上完成。实验过程中使用锆石国际标样GJ1为参考,Hf同位素分析点在U-Pb分析点上进行,采用He作为剥蚀物质载气,剥蚀直径采用60 μm,剥蚀时间为26.2 s。分析流程及Yb、Lu的校正方法详见侯可军等(2007)。测试锆石标准GJ1的29个点$^{176}Hf/^{177}Hf$测试加权平均值为0.282 006±2(2σ),与文献报道值(Elhlou *et al*., 2006; 侯可军等, 2007)在误差范围内完全一致。

全岩Sr、Nd、Pb同位素测试分析在核工业地质分析测试研究中心热电离质谱仪上完成,仪器型号为ISOPROBE-T。Sr同位素比值测定的内校正因子采用$^{86}Sr/^{88}Sr$=0.119 4,NBS-987标准测量结果为$^{87}Sr/^{86}Sr$=0.710 250±7(2σ),Nd同位素比值采用$^{146}Nd/^{144}Nd$=0.721 9,SHINESTU校正标准测量结果为0.512 118±3(2σ),Pb同位素比值采用$^{206}Pb/^{204}Pb$ = 16.94 ± 4(2σ),$^{207}Pb/^{204}Pb$ = 15.498 ± 4(2σ),$^{208}Pb/^{204}Pb$=36.728±9(2σ)。

4 结果

4.1 锆石U-Pb年龄

本文对甲山正长岩体中粗粒含角闪辉石正长岩(JS11-3)、粗粒辉石角闪石英正长岩(JS11-1)、中细粒似斑状含辉石角闪石英正长岩(JS11-4)进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,测试结果列于表1。

锆石为无色或浅黄褐色,透明,颗粒大小较为均一,在形态上为自形短柱状或长柱状。JS11-1、JS11-3、JS11-4锆石粒径分别在60~180、70~200、40~200 μm之间,长宽比分别介于1.5:1~3:1、1:1~2:1、1:1~2:1之间。从代表性锆石的CL图像(图3)中可以看出,锆石的内部结构简单,无残留锆石核,指示其为岩浆成因锆石。对样品JS11-1(15颗)、JS11-3(7颗)、JS11-4(15颗)中的锆石进行了分析点的年龄测定,锆石中的Th、U含量较高,且变化范围较宽,Th含量主要在8×10^{-6}~76×10^{-6}、32×10^{-6}~106×10^{-6}、15×10^{-6}~75×10^{-6}之间,U含量分别在9×10^{-6}~89×10^{-6}、46×10^{-6}~102×10^{-6}、19×10^{-6}~78×10^{-6}之间。锆石的Th/U值分别介于0.76~1.02、0.66~1.03、0.67~0.96之间,具有岩浆成因锆石的化学成分特征(Th/U值一般>0.4,吴元保等, 2004)。JS11-1(15个分析点)的$^{206}Pb/^{238}U$年龄介于103~110 Ma之间,对应的加权平均年龄为108.5±0.4 Ma,MSWD=1.3(图4a)。样品JS11-3(7个分析点)的$^{206}Pb/^{238}U$年龄介于110~112 Ma之间,对应的加权平均年龄为110.6±0.5 Ma,MSWD=1.8(图4b)。JS11-4(15个分析点)的$^{206}Pb/^{238}U$年龄介于110~115 Ma之间,对应的加权平均年龄为111.7±0.5,MSWD=0.7(图4c)。

4.2 主量元素

本文共对甲山岩体的4件典型样品进行了主量元素分析,具体的分析测试结果列于表2。甲山岩体的SiO_2含量介于61.46%~64.56%之间。岩体K_2O和Na_2O含量高,相对富碱(10.13%~11.03%),里特曼指数σ为4.79~6.5。除中粗粒含角闪辉石正长岩的K_2O/Na_2O<1外,其它样品的该比值(均值1.03)>1,岩石的平均K_2O含量为5.39%,相对富钾。岩体Al_2O_3含量较高,为15.30%~15.96%,铝饱和指数A/CNK为0.83~0.87,均小于1,属于准铝质岩石。此外,甲山岩体有较高的$Fe_2O_3^T$(5.15%~6.36%)、CaO(1.81%~2.25%)含量;较低的TiO_2(0.49%~0.70%)、MgO(0.32%~0.70%)、P_2O_5(0.11%~0.22%)和MnO(0.11%~0.14%)含量。

4.3 微量元素

表3列出了甲山岩体微量及稀土元素分析结果,图5为其微量元素相对于原始地幔标准化的蛛

表 1　甲山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Table 1　LA-ICP-MS U-Pb data of zircons of the Jiashan pluton

分析点	$w_B/10^{-6}$				同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ
JS11-1																
JS11-1-1	0.8	8	11	0.76	0.039 29	0.007 28	0.113 67	0.037 07	0.017 07	0.000 75	error		109	34	109	5
JS11-1-2	60.3	73	78	0.94	0.050 29	0.002 55	0.120 47	0.007 38	0.017 22	0.000 09	209	117	116	7	110	1
JS11-1-3	27.0	46	62	0.75	0.075 81	0.027 57	0.113 93	0.007 79	0.017 15	0.000 47	1 100	782	110	7	110	3
JS11-1-4	84.4	76	89	0.85	0.048 27	0.000 58	0.111 54	0.001 38	0.016 78	0.000 08	122	28	107	1	107	1
JS11-1-5	54.1	73	79	0.93	0.049 45	0.000 57	0.116 30	0.001 41	0.017 07	0.000 09	169	26	112	1	109	1
JS11-1-6	17.8	36	36	1.01	0.049 39	0.001 41	0.114 41	0.003 38	0.016 89	0.000 16	165	67	110	3	108	1
JS11-1-7	42.3	46	48	0.95	0.050 64	0.001 09	0.118 48	0.002 74	0.016 97	0.000 10	233	50	114	2	109	1
JS11-1-8	41.2	52	55	0.95	0.049 66	0.000 98	0.116 63	0.002 50	0.017 05	0.000 11	189	51	112	2	109	1
JS11-1-9	21.5	8	9	0.83	0.393 10	0.257 46	0.106 62	0.014 10	0.016 09	0.001 44	3 883	1 226	103	13	103	9
JS11-1-10	0.3	38	42	0.90	0.055 90	0.008 01	0.112 18	0.003 97	0.016 88	0.000 43	456	319	108	4	108	3
JS11-1-11	4.4	59	64	0.92	0.049 17	0.001 35	0.115 15	0.003 36	0.016 97	0.000 08	167	60	111	3	108	1
JS11-1-12	28.6	44	43	1.02	0.048 47	0.001 02	0.112 39	0.002 30	0.016 87	0.000 10	124	50	108	2	108	1
JS11-1-13	51.5	50	50	0.99	0.049 64	0.000 99	0.115 18	0.002 25	0.016 88	0.000 09	189	51	111	2	108	1
JS11-1-14	46.9	47	55	0.85	0.051 21	0.003 06	0.123 82	0.011 63	0.016 99	0.000 12	250	139	119	11	109	1
JS11-1-15	68.1	63	79	0.80	0.049 64	0.000 86	0.116 06	0.002 11	0.016 98	0.000 09	189	8	111	2	109	1
JS11-3																
JS11-3-3	44.1	51	54	0.94	0.050 50	0.000 76	0.119 80	0.001 72	0.017 24	0.000 08	217	32	115	2	110	1
JS11-3-4	71.9	106	102	1.03	0.050 45	0.000 54	0.119 32	0.001 29	0.017 16	0.000 07	217	24	114	1	110	0
JS11-3-5	23.0	37	52	0.71	0.049 93	0.000 60	0.119 38	0.001 53	0.017 35	0.000 10	191	28	115	1	111	1
JS11-3-6	25.5	55	59	0.94	0.050 64	0.000 76	0.121 30	0.001 87	0.017 38	0.000 11	233	33	116	2	111	1
JS11-3-7	27.5	44	47	0.94	0.050 29	0.000 91	0.120 62	0.002 41	0.017 38	0.000 11	209	43	116	2	111	1
JS11-3-8	19.8	49	73	0.66	0.048 85	0.000 72	0.117 14	0.001 74	0.017 40	0.000 10	139	35	112	2	111	1
JS11-3-9	12.0	32	49	0.66	0.050 46	0.000 96	0.121 87	0.002 25	0.017 55	0.000 12	217	44	117	2	112	1
JS11-4																
JS11-4-1	28.9	60	67	0.90	0.049 21	0.000 42	0.118 71	0.001 50	0.017 47	0.000 15	167	−12	114	1	112	1
JS11-4-2	17.4	34	42	0.81	0.049 44	0.000 71	0.119 20	0.002 67	0.017 54	0.000 33	169	6	114	2	112	2
JS11-4-3	21.5	65	68	0.96	0.050 60	0.000 51	0.121 44	0.002 41	0.017 40	0.000 29	233	29	116	2	111	2
JS11-4-4	17.3	43	49	0.88	0.050 38	0.000 62	0.122 06	0.002 39	0.017 61	0.000 29	213	30	117	2	113	2
JS11-4-5	12.4	25	35	0.71	0.049 76	0.000 89	0.120 57	0.002 72	0.017 57	0.000 26	183	45	116	2	112	2
JS11-4-6	3.3	45	49	0.92	0.048 24	0.006 61	0.119 33	0.017 65	0.017 61	0.000 17	109	296	114	16	113	1
JS11-4-7	4.1	38	44	0.86	0.047 58	0.008 32	0.115 09	0.018 94	0.017 56	0.000 17	80	370	111	17	112	1
JS11-4-8	10.1	26	39	0.67	0.048 02	0.000 75	0.116 64	0.002 32	0.017 56	0.000 22	102	68	112	2	112	1
JS11-4-10	35.7	75	78	0.96	0.049 05	0.000 58	0.118 25	0.001 38	0.017 48	0.000 10	150	28	113	1	112	1
JS11-4-11	22.7	37	39	0.95	0.050 46	0.000 80	0.121 39	0.001 91	0.017 45	0.000 11	217	32	116	2	112	1
JS11-4-12	11.2	28	31	0.91	0.050 68	0.000 97	0.122 47	0.002 33	0.017 54	0.000 12	233	72	117	2	112	1
JS11-4-14	12.2	26	31	0.83	0.047 96	0.000 91	0.115 46	0.002 22	0.017 47	0.000 12	98	46	111	2	112	1
JS11-4-15	14.5	35	38	0.92	0.050 38	0.000 78	0.119 36	0.001 75	0.017 24	0.000 11	213	40	114	2	110	1
JS11-4-18	7.1	15	19	0.79	0.050 51	0.001 15	0.121 46	0.002 78	0.017 49	0.000 14	217	84	116	3	112	1
JS11-4-19	4.8	5	9	0.58	0.050 58	0.003 37	0.126 63	0.009 08	0.018 03	0.000 33	220	154	121	8	115	2

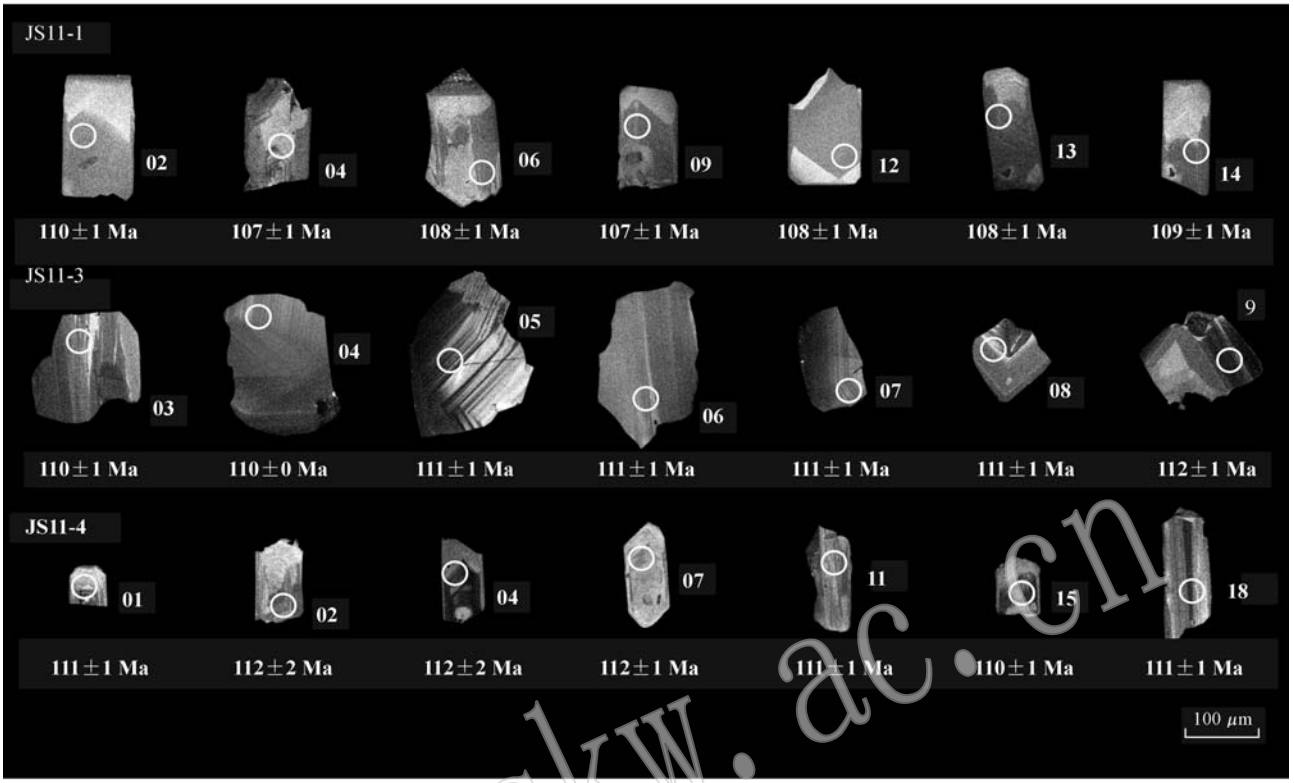


图 3 甲山岩体中代表性锆石 CL 图像

Fig. 3 Representative CL images of zircon grains of the Jiashan pluton

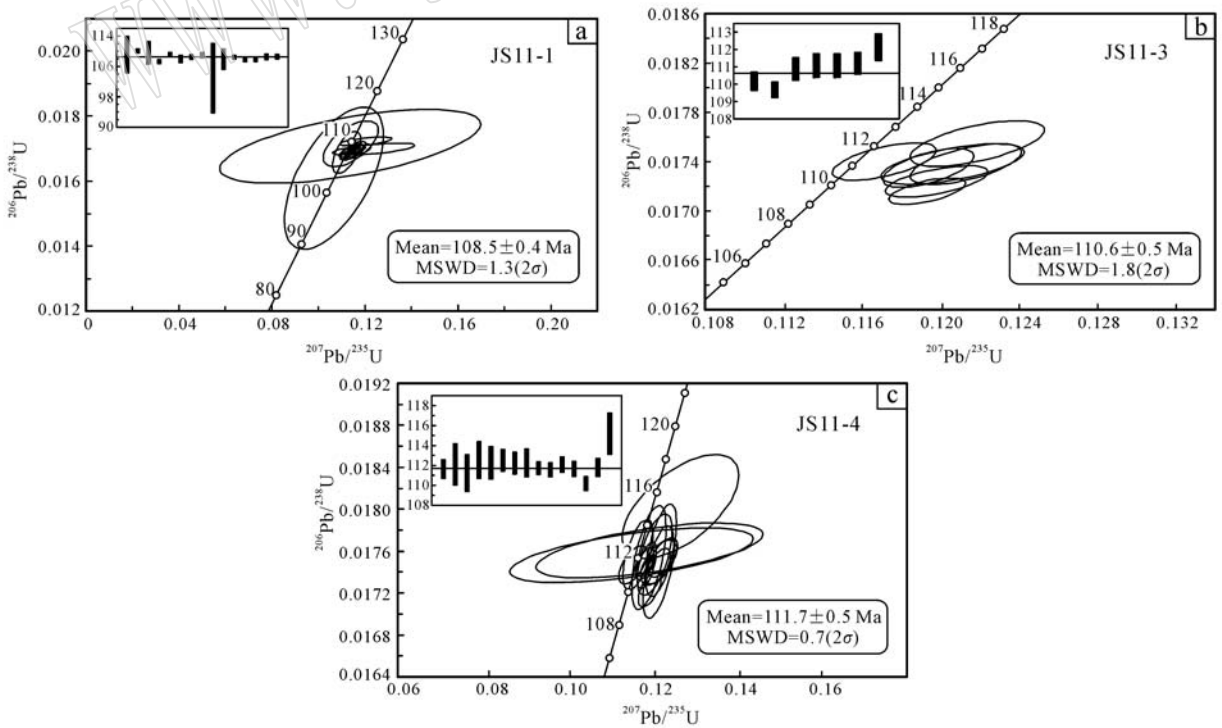


图 4 甲山岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of the Jiashan pluton

www.yskw.ac.cn

表 2　甲山岩体主量元素分析结果　　w_B/%

Table 2　Major oxides of the Jiashan pluton

	JS11-3	JS11-1	JS11-2	JS11-4		JS11-3	JS11-1	JS11-2	JS11-4
SiO_2	61.46	64.56	64.45	64.30	K_2O	5.50	5.47	5.44	5.16
TiO_2	0.66	0.49	0.51	0.70	P_2O_5	0.20	0.12	0.11	0.22
Al_2O_3	15.96	15.37	15.65	15.30	烧失量	1.19	1.10	0.90	0.70
Fe_2O_3	2.96	2.34	2.11	2.68	总量	98.91	98.90	99.07	99.34
FeO	3.70	3.15	3.25	3.15	A/CNK	0.83	0.87	0.87	0.87
MnO	0.14	0.12	0.12	0.11	Na_2O+K_2O	11.03	10.62	10.74	10.13
MgO	0.55	0.32	0.32	0.70	K_2O/Na_2O	0.99	1.06	1.03	1.04
CaO	2.25	1.81	1.81	2.05	分异指数(DI)	83.30	86.14	86.02	83.60
Na_2O	5.53	5.15	5.30	4.97	σ	6.50	5.18	5.33	4.79

网图及稀土元素球粒陨石标准化配分曲线。甲山岩体具有较高的 Ba(494×10^{-6}～810×10^{-6})、Y(34.7×10^{-6}～59.6×10^{-6})含量，较低的 Rb(94×10^{-6}～189×10^{-6})、Sr(108×10^{-6}～198×10^{-6})、Yb(3.61×10^{-6}～6.55×10^{-6})含量，因而具有较低的 Sr/Y(1.88～3.44)、Rb/Ba 值(0.16～0.29)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中，明显富集 Rb、K 等大离子亲石元素(LILEs)和 Th、U，强烈亏损 Sr、P 和高场强元素(HFSE)Ti 等，Ba 亦有轻微的亏损，但不存在 Nb、Ta 负异常(除 JS11-3)，具有板内裂谷岩浆岩的特征(孙书勤等，2007)。甲山岩体稀土元素总量较高，∑REE 值变化于 235.3×10^{-6}～463.0×10^{-6}。富轻稀土元素，LREE/HREE=7.13～9.86，$(La/Yb)_N$=7.61～11.06，稀土元素配分曲线呈右倾斜型，其中轻稀土元素的分馏较重稀土元素明显。多数样品的 δEu=0.46～0.52(图 5)，表明岩浆具有明显的结晶分异。与其他 3 件样品相比，样品 JS11-3(δEu=0.83)的 SiO_2 含量较低，FeO^T 含量较高(表 2)，可能与其位于岩体边缘岩浆快速冷凝、分异不彻底有关，从而造成 Eu 负异常不太明显，U、Th 含量较低，并在蛛网图上具有 Ta 的负异常。

表 3　甲山岩体微量元素分析结果　　$w_B/10^{-6}$

Table 3　Trace elements of the Jiashan pluton

	JS11-3	JS11-1	JS11-2	JS11-4		JS11-3	JS11-1	JS11-2	JS11-4
Rb	94	156	145	189	La	49.00	101.00	59.20	90.10
Sr	108	112	112	198	Ce	93.60	201.00	111.00	164.00
Ba	585	547	494	810	Pr	11.20	21.30	13.70	19.00
U	1.48	3.43	3.42	3.87	Nd	45.50	82.50	53.00	70.30
Th	6.58	15.60	13.00	19.50	Sm	8.33	12.60	10.10	12.50
Pb	16.50	18.20	15.80	28.00	Eu	2.20	1.93	1.58	2.05
Sc	4.36	3.12	4.60	5.36	Gd	7.70	13.10	8.84	11.10
Y	34.70	59.60	51.50	57.60	Tb	1.28	1.99	1.66	1.86
Ga	25.10	30.50	25.80	27.80	Dy	6.78	10.80	9.67	10.60
Nb	45.80	88.50	79.40	92.70	Ho	1.30	1.96	1.85	2.05
Ta	1.53	5.85	5.19	6.58	Er	3.70	6.38	5.59	6.12
Zr	130	157	135	337	Tm	0.56	0.95	0.84	0.98
Hf	3.78	5.88	5.20	9.42	Yb	3.61	6.55	5.58	6.32
V	84.80	64.20	96.80	92.10	Lu	0.58	0.92	0.83	0.92
Cr	9.60	9.86	10.90	13.10	∑REE	235.3	463.0	283.4	397.9
Co	3.44	2.06	2.01	5.90	LREE/HREE	8.23	9.86	7.13	8.96
Ni	1.78	1.57	1.45	3.07	$(La/Yb)_N$	9.74	11.06	7.61	10.23
K/Rb	486	291	311	227	$(La/Sm)_N$	3.80	5.17	3.78	4.65
Rb/Sr	0.87	1.39	1.29	0.95	$(Gd/Yb)_N$	1.76	1.65	1.31	1.45
Nb/Ta	29.9	15.1	15.3	14.1	δEu	0.83	0.46	0.50	0.52

注：$\delta Eu=Eu_N/(Sm_N\times Gd_N)^{1/2}$；下标 N 表示球粒陨石标准化。

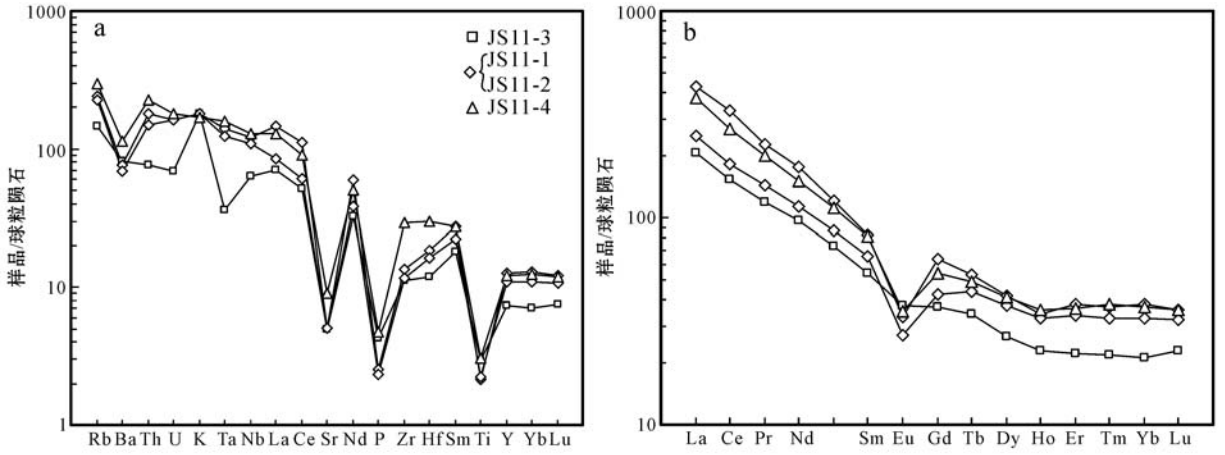


图 5 微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(b)(标准值据 Sun 和 McDonough，1989)

Fig. 5 Primitive mantle (PM) normalized trace element diagrams(a) and chondrite-normalized REE patterns (b) (from Sun and McDonough，1989)

4.4 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素

甲山岩体全岩 Sr－Nd 同位素数据如表 4、5 所示。岩体$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$较低，为0.705 9～0.706 9，$\varepsilon Nd(t)$值为－0.9～－5.0，t_{DM2}模式年龄为 0.98～1.31 Ga。

甲山岩体 Pb 同位素数据如表 6 所示。Δ8/4＝84.9～91.3，Δ7/4＝－4.0～－6.4，$(^{206}Pb/^{204}Pb)_i$＝16.63 ～ 17.10，$(^{207}Pb/^{204}Pb)_i$ ＝ 15.24 ～ 15.30，$(^{208}Pb/^{204}Pb)_i$ ＝ 36.54 ～ 37.20。此处 $\Delta7/4 = [(^{207}Pb/^{204}Pb)_i - (^{207}Pb/^{204}Pb)_{NHRL}] \times 100$，$\Delta8/4 = [(^{208}Pb/^{204}Pb)_i - (^{208}Pb/^{204}Pb)_{NHRL}] \times 100$，$(^{207}Pb/^{204}Pb)_{NHRL} = 0.108\,4 \times (^{206}Pb/^{204}Pb)_i + 13.491$，$(^{208}Pb/^{204}Pb)_{NHRL} = 1.209 \times (^{206}Pb/^{204}Pb)_i + 15.627$。

表 4 甲山岩体 Rb-Sr 同位素分析结果

Table 4 Rb-Sr isotopic compositions of the Jiashan pluton

样号	$w(Rb)/10^{-6}$	$w(Sr)/10^{-6}$	$(^{87}Rb/^{86}Sr)_m$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_m$	t/Ma	$\varepsilon Sr(0)$	$\varepsilon Sr(t)$	$f_{Rb/Sr}$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$
JS11-3	94.8	118	2.323 0	0.709 571	110	72.0	22.3	27.09	0.705 94
JS11-1	134	107	3.640 0	0.712 453	108	112.9	35.4	43.01	0.706 87
JS11-2	138	116	3.459 9	0.712 158	108	108.7	35.1	40.84	0.706 85
JS11-4	159	174	2.494 0	0.710 742	111	88.6	34.6	29.16	0.706 81

表 5 甲山岩体 Sm-Nd 同位素分析结果

Table 5 Sm-Nd isotopic compositions of the Jiashan pluton

样号	$w(Sm)/10^{-6}$	$w(Nd)/10^{-6}$	$(^{147}Sm/^{144}Nd)_m$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_m$	t/Ma	$\varepsilon Nd(0)$	$\varepsilon Nd(t)$	$f_{Sm/Nd}$	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$	t_{DM}	t_{DM2}
JS11-3	8.97	48.4	0.112 0	0.512 407	110	－4.5	－3.3	－0.43	0.512 326	1 116	1 179
JS11-1	11.5	66.3	0.104 6	0.512 369	108	－5.2	－4.0	－0.47	0.512 295	1 093	1 231
JS11-2	10.2	53	0.116 4	0.512 534	108	－2.0	－0.9	－0.41	0.512 452	968	982
JS11-4	10.6	61	0.105 3	0.512 317	111	－6.3	－5.0	－0.46	0.512 241	1 173	1 314

表 6 甲山岩体 Pb 同位素分析结果

Table 6 Pb isotopic compositions for the Jiashan pluton

样号	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$	$(^{206}Pb/^{204}Pb)_i$	$(^{207}Pb/^{204}Pb)_i$	$(^{208}Pb/^{204}Pb)_i$	Δ7/4	Δ8/4
JS11-3	17.184	15.306	37.331	17.09	15.302	37.196	－4.22	90.56
JS11-1	17.006	15.283	37.155	16.81	15.274	36.866	－3.98	91.32
JS11-2	17.019	15.267	37.096	16.80	15.256	36.819	－5.55	88.49
JS11-4	16.736	15.233	36.772	16.60	15.226	36.540	－6.37	84.89

www.yskw.ac.cn

甲山岩体 Hf 同位素数据如表 7 所示。岩体 $^{176}Hf/^{177}Hf$变化范围小，介于0.282 628～0.282 827之间，$\varepsilon Hf(t) = -2.8 \sim +4.3$，Hf 同位素 t_{DM2}模式年龄为 0.90～1.33 Ga（图 6），与上述全岩 Sm－Nd 同位素获得的 t_{DM2}模式年龄（0.98～1.31 Ga）近于一致。

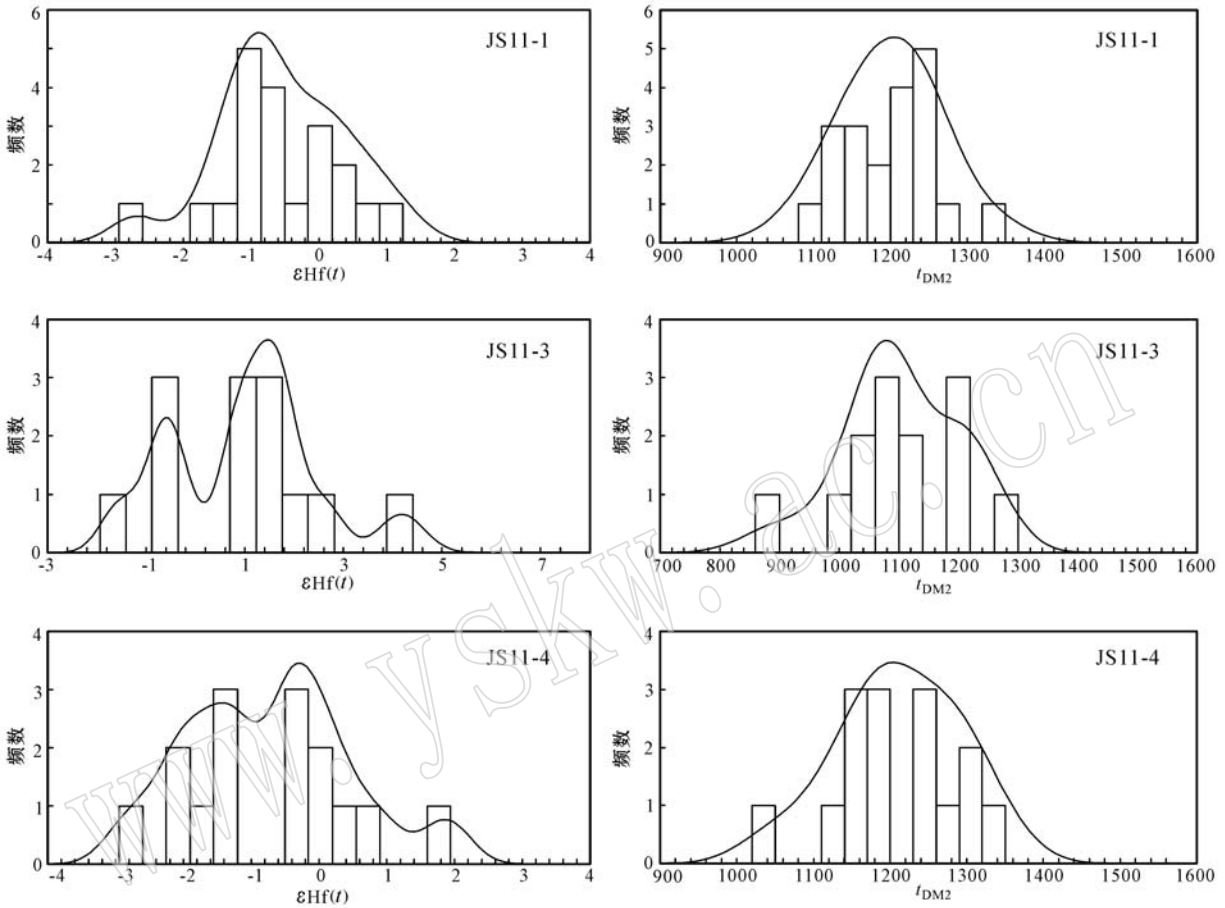


图 6　甲山岩体 $\varepsilon Hf(t)$、t_{DM2}频率图

Fig. 6　Frequency histogram of $\varepsilon Hf(t)$ and t_{DM2} for the Jiashan pluton

5　讨论

5.1　侵位年龄

杨富全等（1997）曾获得甲山岩体 K-Ar 全岩年龄 94.94 ± 2.25 Ma，而郑亚东等（2000）、Davis 等（2001）获得的锆石 U-Pb 年龄为 113 ± 2 Ma。本文对甲山岩体从外相带到中心带的岩石开展的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果分别为 110.6 ± 0.5、108.5 ± 0.4 Ma 和 111.7 ± 0.5 Ma，与上述郑亚东等（2000）和 Davis 等（2001）获得的锆石测年结果基本一致。因此，可以认为本文获得的甲山岩体锆石U-Pb 测年结果 108～111 Ma 代表了岩体的结晶年龄，反映其经历了完整的结晶过程。在华北克拉通东部广泛发育着一期早白垩世（110～130 Ma）A 型花岗岩及伴生的碱性岩，如雾灵山岩体岩性主要为碱长正长岩和石英正长岩，侵位时代为 130 ± 1 和 129 ± 1 Ma（锆石 U-Pb 年龄，Davis *et al*.，2001；Yang *et al*.，2008；孙金凤等，2009），千层背、响山、窟窿山岩体主要为角闪石花岗岩，其侵位时代分别为 129 ± 1、117 ± 1 和 127 ± 1 Ma（锆石 U-Pb 年龄，Davis *et al*.，2001；Yang *et al*.，2008；孙金凤等，2009）。甲山岩体就是区域上早白垩世 A 型花岗岩的代表岩体之一。

www.yskw.ac.cn

表 7 甲山岩体 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 7 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Jiashan pluton

点号	$^{176}Hf/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	t/Ma	εHf(0)	$(^{176}Hf/^{177}Hf)_0$	εHf(t)	2σ	t_{DM1}/Ma	2σ	$f_{Lu/Hf}$	t_{DM2-1}/Ma	2σ
JS11-1 01	0.282 695	0.000 749	0.041 170	0.000 241	109.1	−2.7	0.282 694	−0.4	0.8	784	65	−0.98	1 191	104
JS11-1 02	0.282 686	0.001 237	0.070 801	0.000 596	110.1	−3.1	0.282 683	−0.7	0.8	808	61	−0.96	1 214	96
JS11-1 03	0.282 732	0.001 086	0.061 092	0.002 224	109.6	−1.4	0.282 730	0.9	0.8	740	66	−0.97	1 110	105
JS11-1 04	0.282 682	0.000 941	0.052 347	0.001 968	107.3	−3.2	0.282 680	−0.9	0.9	807	71	−0.97	1 223	113
JS11-1 05	0.282 709	0.000 719	0.039 023	0.000 554	118.4	−2.2	0.282 707	0.3	0.7	765	53	−0.98	1 155	85
JS11-1 06	0.282 709	0.000 672	0.036 022	0.000 364	110.5	−2.2	0.282 708	0.2	0.7	763	56	−0.98	1 158	90
JS11-1 07	0.282 676	0.001 157	0.062 879	0.001 009	109.1	−3.4	0.282 674	−1.1	0.8	820	62	−0.97	1 236	98
JS11-1 08	0.282 722	0.000 946	0.051 475	0.001 814	108.0	−1.8	0.282 720	0.5	0.8	750	63	−0.97	1 132	100
JS11-1 09	0.282 722	0.000 971	0.053 103	0.000 206	108.5	−1.8	0.282 720	0.5	0.7	751	58	−0.97	1 132	92
JS11-1 10	0.282 693	0.001 064	0.058 358	0.002 282	109.0	−2.8	0.282 691	−0.5	0.7	794	59	−0.97	1 197	94
JS11-1 11	0.282 686	0.000 817	0.042 859	0.000 438	102.9	−3.0	0.282 685	−0.8	0.8	798	63	−0.98	1 215	100
JS11-1 12	0.282 742	0.001 170	0.061 619	0.000 182	106.9	−1.1	0.282 739	1.2	0.8	727	67	−0.96	1 090	105
JS11-1 13	0.282 630	0.000 876	0.045 566	0.001 535	107.9	−5.0	0.282 628	−2.7	0.7	878	58	−0.97	1 338	92
JS11-1 14	0.282 678	0.000 815	0.043 050	0.001 699	108.4	−3.3	0.282 676	−1.0	0.8	810	63	−0.98	1 231	101
JS11-1 15	0.282 667	0.001 008	0.053 830	0.001 552	107.9	−3.7	0.282 665	−1.4	0.7	830	54	−0.97	1 256	86
JS11-1 16	0.282 659	0.001 133	0.063 816	0.000 793	112.0	−4.0	0.282 657	−1.6	0.8	843	62	−0.97	1 271	99
JS11-1 17	0.282 678	0.001 414	0.077 294	0.001 102	106.6	−3.3	0.282 675	−1.1	0.8	823	62	−0.96	1 235	97
JS11-1 18	0.282 707	0.001 292	0.072 410	0.000 230	107.9	−2.3	0.282 704	0.0	0.7	780	59	−0.96	1 168	93
JS11-1 19	0.282 676	0.000 781	0.042 127	0.000 373	108.6	−3.4	0.282 674	−1.1	0.7	812	58	−0.98	1 234	92
JS11-1 20	0.282 690	0.001 152	0.064 832	0.001 849	108.6	−2.9	0.282 687	−0.6	0.8	801	63	−0.97	1 206	101
JS11-3 03	0.282 755	0.001 504	0.090 928	0.000 389	110.2	−0.6	0.282 752	1.7	0.8	714	67	−0.95	1 058	105
JS11-3 05	0.282 693	0.000 987	0.059 298	0.000 611	110.9	−2.8	0.282 691	−0.4	0.7	793	60	−0.97	1 196	95
JS11-3 06	0.282 758	0.001 102	0.066 185	0.000 396	111.1	−0.5	0.282 756	1.9	0.7	702	59	−0.97	1 049	94
JS11-3 07	0.282 754	0.001 329	0.079 198	0.000 338	111.1	−0.6	0.282 751	1.7	0.8	713	63	−0.96	1 060	99
JS11-3 08	0.282 686	0.000 691	0.040 166	0.000 152	111.2	−3.0	0.282 685	−0.7	0.7	796	56	−0.98	1 210	90

www.yskw.ac.cn

续表　7

Continued Table　7

点号	$^{176}Hf/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	t/Ma	$\varepsilon Hf(0)$	$(^{176}Hf/^{177}Hf)_0$	$\varepsilon Hf(t)$	2σ	t_{DM1}/Ma	2σ	$f_{Lu/Hf}$	$t_{DM2\text{-}1}$/Ma	2σ
JS11-3 09	0.282 729	0.000 681	0.039 712	0.000 089	112.1	−1.5	0.282 728	0.9	0.7	735	59	−0.98	1 112	95
JS11-3 10	0.282 663	0.000 880	0.050 694	0.000 435	114.6	−3.8	0.282 661	−1.4	0.8	832	60	−0.97	1 260	96
JS11-3 11	0.282 827	0.001 869	0.111 652	0.000 281	114.2	1.9	0.282 823	4.3	0.9	617	76	−0.94	896	118
JS11-3 14	0.282 695	0.001 148	0.067 464	0.000 708	116.6	−2.7	0.282 693	−0.3	0.9	793	69	−0.97	1 189	110
JS11-3 15	0.282 740	0.000 610	0.035 027	0.000 166	112.2	−1.1	0.282 739	1.3	0.8	719	67	−0.98	1 087	108
JS11-3 16	0.282 730	0.000 355	0.019 731	0.000 345	110.9	−1.5	0.282 729	0.9	0.8	728	60	−0.99	1 110	97
JS11-3 17	0.282 781	0.001 029	0.059 742	0.000 067	112.7	0.3	0.282 779	2.7	0.8	668	62	−0.97	996	99
JS11-3 19	0.282 746	0.001 137	0.063 858	0.000 050	110.3	−0.9	0.282 744	1.4	0.8	720	65	−0.97	1 077	103
JS11-4 01	0.282 762	0.001 852	0.106 433	0.001 978	111.6	−0.4	0.282 758	2.0	0.7	711	58	−0.94	1 044	90
JS11-4 02	0.282 694	0.000 578	0.031 531	0.000 747	112.1	−2.8	0.282 693	−0.3	0.6	783	49	−0.98	1 191	80
JS11-4 03	0.282 673	0.000 962	0.053 675	0.001 276	111.2	−3.5	0.282 671	−1.2	0.9	821	68	−0.97	1 242	108
JS11-4 04	0.282 669	0.001 147	0.064 068	0.001 628	112.5	−3.7	0.282 666	−1.3	0.8	830	62	−0.97	1 250	99
JS11-4 05	0.282 672	0.000 594	0.032 225	0.000 814	112.3	−3.5	0.282 671	−1.1	0.7	814	56	−0.98	1 241	90
JS11-4 06	0.282 714	0.000 765	0.042 432	0.001 672	112.5	−2.1	0.282 712	0.4	0.7	758	57	−0.98	1 147	91
JS11-4 07	0.282 696	0.000 723	0.039 831	0.001 566	112.2	−2.7	0.282 694	−0.3	0.7	783	58	−0.98	1 187	94
JS11-4 08	0.282 648	0.000 576	0.031 111	0.000 587	112.2	−4.4	0.282 647	−2.0	0.7	846	52	−0.98	1 294	84
JS11-4 10	0.282 707	0.001 670	0.093 761	0.000 610	111.7	−2.3	0.282 704	0.0	0.8	786	65	−0.95	1 166	102
JS11-4 11	0.282 733	0.001 903	0.104 156	0.002 725	111.6	−1.4	0.282 730	0.9	0.7	754	59	−0.94	1 109	92
JS11-4 12	0.282 628	0.000 717	0.038 259	0.000 999	112.1	−5.1	0.282 626	−2.7	0.7	878	57	−0.98	1 340	91
JS11-4 14	0.282 659	0.000 653	0.035 066	0.000 383	111.6	−4.0	0.282 658	−1.6	0.8	833	60	−0.98	1 270	96
JS11-4 16	0.282 647	0.000 808	0.043 476	0.000 556	110.2	−4.4	0.282 645	−2.1	0.8	853	61	−0.98	1 299	98
JS11-4 18	0.282 692	0.000 597	0.032 358	0.000 519	111.8	−2.8	0.282 691	−0.4	0.8	785	65	−0.98	1 195	104
JS11-4 19	0.282 705	0.000 476	0.025 673	0.000 093	115.2	−2.4	0.282 704	0.1	0.8	764	60	−0.99	1 163	97

www.yskw.ac.cn

5.2 岩石成因

5.2.1 岩体起源

在 K_2O+Na_2O、$Fe_2O_3^T/MgO$、Zr、Nb－$10^4Ga/Al$ 关系图解上，甲山岩体的投点均位于 A 型花岗岩区（图 7）。许保良等（1998）认为 A 型花岗岩的物质来源具有多样性，亏损地幔、原始地幔、富集地幔、壳-幔和地壳物质都可能是这类岩石的潜在源岩。华北克拉通燕山地区存在大量的早白垩世 A 型花岗岩（Wu *et al*.，2005；孙金凤等，2009），如甲山岩体、石湖山火山-侵入杂岩体、响山岩体、雾灵山侵入杂岩体、千层背岩体、东猴顶岩体和窟窿山岩体，研究显示这些岩体来自不同的源区，包括上地壳、下地壳和岩石圈地幔（杨富全等，2003；Yang *et al*.，2008），是不同的岩浆经过分离结晶、岩浆混合作用形成的（孙金凤等，2009）。根据野外地质观察、实验岩石学以及元素地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素示踪的综合分析，我们认为甲山岩体可能起源于下地壳与亏损地幔的混合源区，理由如下：

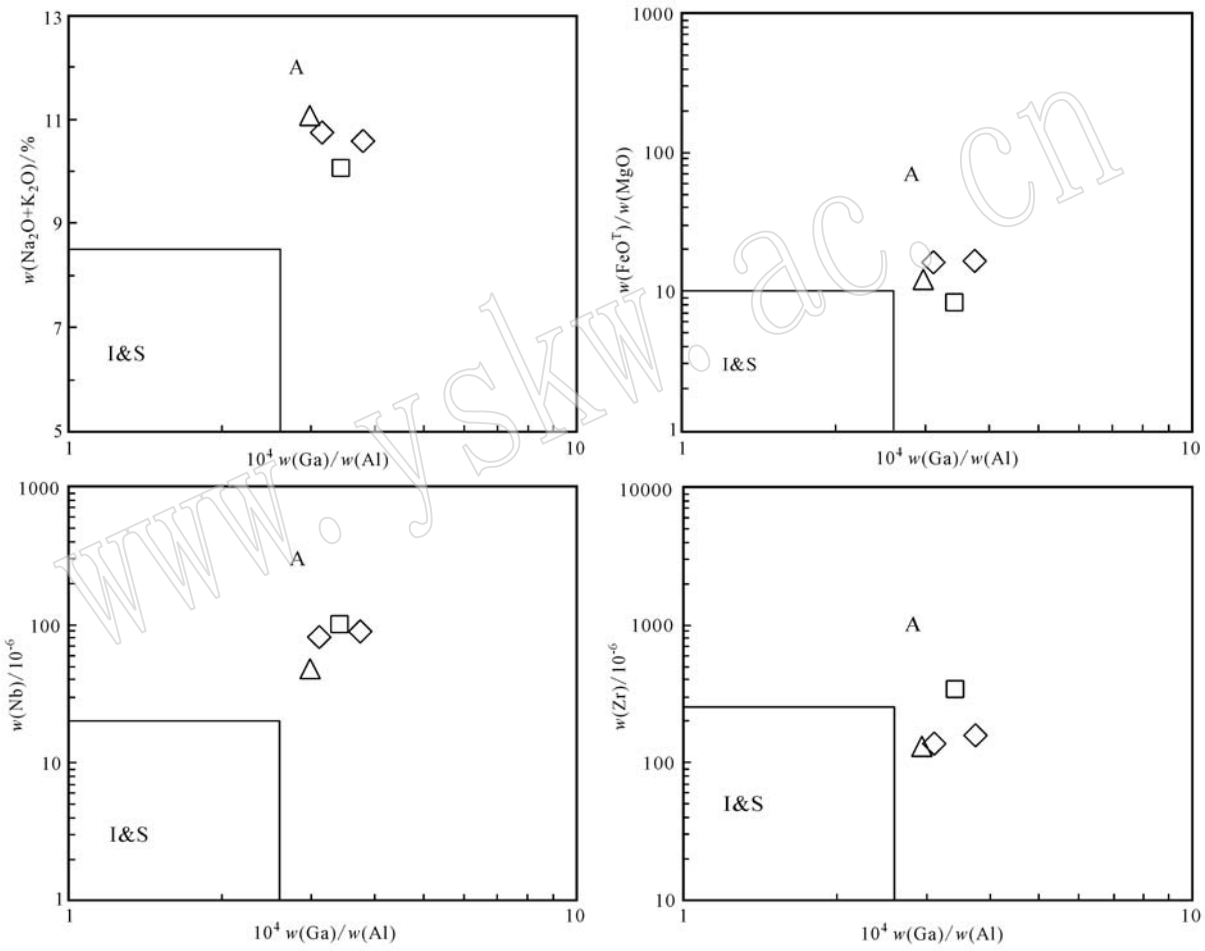


图 7 甲山岩体 K_2O+Na_2O、$Fe_2O_3^T/MgO$、Nb、Zr－10^4 Ga/Al 图解（图例同图 5）

Fig. 7 K_2O+Na_2O, $Fe_2O_3^T/MgO$, Nb and Zr versus 10^4 Ga/Al diagrams of the Jiashan pluton (symbols as for Fig. 5)

（1）实验岩石学证据。在极端情况下，幔源岩浆的强烈结晶分异可能会产生有限的低 Sr、Eu 的碱性岩石，而此时应与大规模的镁铁质岩石伴生（孙金凤等，2009），但是野外地质观察并没有在甲山岩体及其周围发现大规模的镁铁质侵入岩，所以其不可能是单一地幔（亏损地幔或富集地幔）物质直接部分熔融的产物。综合实验岩石学的资料表明，中下地壳中酸性火成岩在高温、贫水的条件下可以熔融形成 A 型花岗质岩浆，同时以斜长石＋斜方辉石作为主要的残留矿物相（贾小君等，2009）。但 Bonin（2007）也指出 A 型花岗岩不可能是单一的地壳来源，其理由是没有令人信服的实验证据证实其单一

www.yskw.ac.cn

的壳源物质来源。所以甲山岩体有可能是下地壳和亏损或富集地幔的混源产物。

（2）Sr-Nd-Pb-Hf 同位素证据。A 型花岗岩的 I_{Sr}值范围跨度非常大，其实际应用意义不大（King *et al*.，1997；Wu *et al*.，2002），但是钕同位素组成则能有效地反映 A 型花岗岩的岩浆源区性质（邱检生等，2000，2005）。甲山岩体高 εNd(t)值（－5.0～－0.9，表 5、图 8）、高 εHf(t)值（－2.7～＋4.3，表 7、图 9）和低 t_{DM2}(Nd)（0.98～1.31 Ga，表 5）、t_{DM2}(Hf)（0.90～1.33 Ga，表 7、图 6）表明亏损地幔物质是其重要来源，因为华北克拉通下地壳的 εNd(t)值、εHf(t)值均为－35（Chen and Zhai，2003；Wang *et al*.，2006；Chen *et al*.，2008），富集地幔的 εNd(t)值、εHf(t)值分别为－13～－8.0（Yang *et al*.，2004a，2004b；Zhang *et al*.，2005）和－9（Yang *et al*.，2006；Chen *et al*.，2008），它们之间差别较大，因此可能具有较多的亏损地幔物质加入。甲山岩体中的锆石 εHf(t)值最高达＋4.3，表明其主

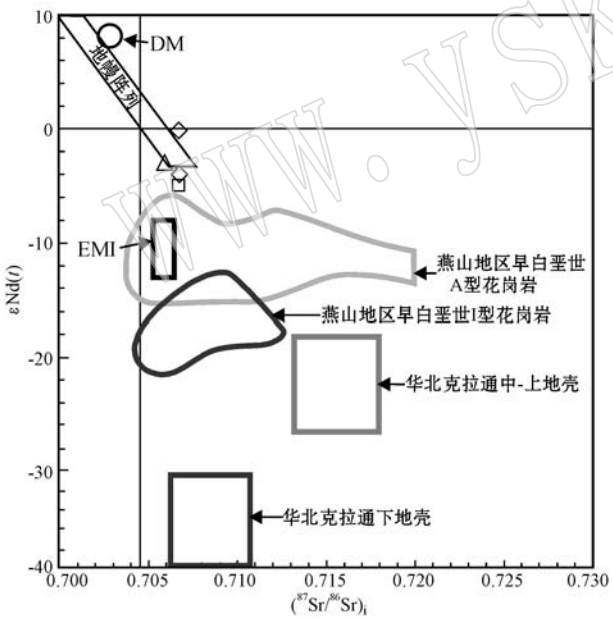


图 8　甲山岩体 εNd(t)－($^{87}Sr/^{86}Sr$)$_i$ 图（图例同图 5）

Fig. 8　εNd(t) versus initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ diagram of the Jiashan pluton (symbols as for Fig. 5)

燕山地区早白垩世 A、I 型花岗岩据孙金凤等（2009）；华北克拉通下地壳及中-上地壳据 Jahn 等（1999）和 Fan 等（2001）；EMI 据 Chen 和 Zhai（2003）；DM 据 Wu 等（2003）

Early Cretaceous A and I-type granites after Sun Jinfeng *et al*. (2009); the lower crust-upper crust of the North China Craton after Jahn *et al*. (1999) and Fan *et al*. (2001); the EMI after Chen and Zhai (2003); DM after Wu *et al*. (2003)

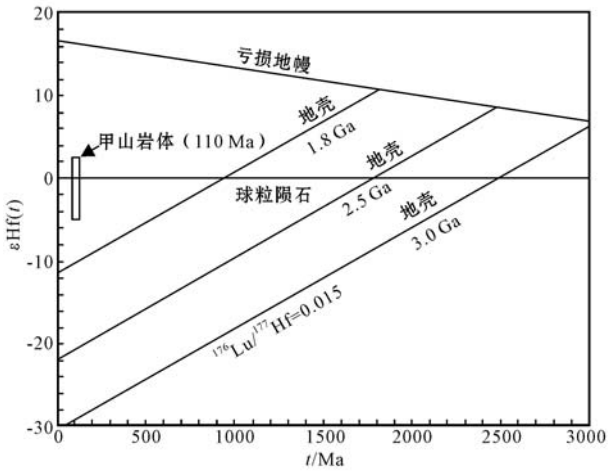


图 9　甲山岩体 εHf(t)特征

Fig. 9　εHf(t) values of the Jiashan pluton

要来自于亏损地幔，而有的锆石 εHf(t)值最低至－2.7，表明其源区可能有较多的下地壳组分。在 εNd(t)-($^{87}Sr/^{86}Sr$)$_i$ 图（图 8）和（$^{206}Pb/^{204}Pb$)$_i$ -($^{207}Pb/^{204}Pb$)$_i$ 图（图 10）中，甲山岩体投点也都位于下地壳和亏损地幔之间，说明甲山岩体可能具有下地壳和亏损地幔的混合来源。

（3）微量元素证据。甲山岩体的 Sr 含量较低，平均只有约 129×10^{-6}，而富集地幔 Sr 含量高达 $1\,100\times10^{-6}$（Chen and Zhai，2003），因此其不可能是富集地幔部分熔融的产物。而亏损地幔和下地壳的 Sr 含量分别为 20×10^{-6}、290×10^{-6}（Wang *et al*.，2006），因此，甲山岩体更有可能是下地壳和亏损地幔的混合产物。

（4）野外地质证据。杨富全等（2003）在野外考察时发现甲山岩体的含辉石角闪石英正长岩中含大量包体，这是岩浆混合的直接地质证据。

上述分析表明，甲山岩体可能来自于下地壳与亏损地幔的混合源区，这与雾灵山岩体的源区（为地壳重熔形成的花岗质岩浆、岩石圈富集地幔以及亏损地幔岩浆混合产物）（陈春良等，2014）明显不同，而与东猴顶岩体的源区（被认为是地壳物质与亏损地幔混合）（梁清玲等，2013）相似。但是，甲山岩体的锆石 εHf(t)值（－2.7～4.3）明显高于东猴顶岩体的锆石 εHf(t)值（－20.5～－9.2）（梁清玲等，2013）（图 11），表明相对于东猴顶岩体，甲山岩体亏损地幔物质加入的更多。

5.2.2　成岩作用讨论

甲山岩体Sr、Nd同位素比值变化范围较小，且

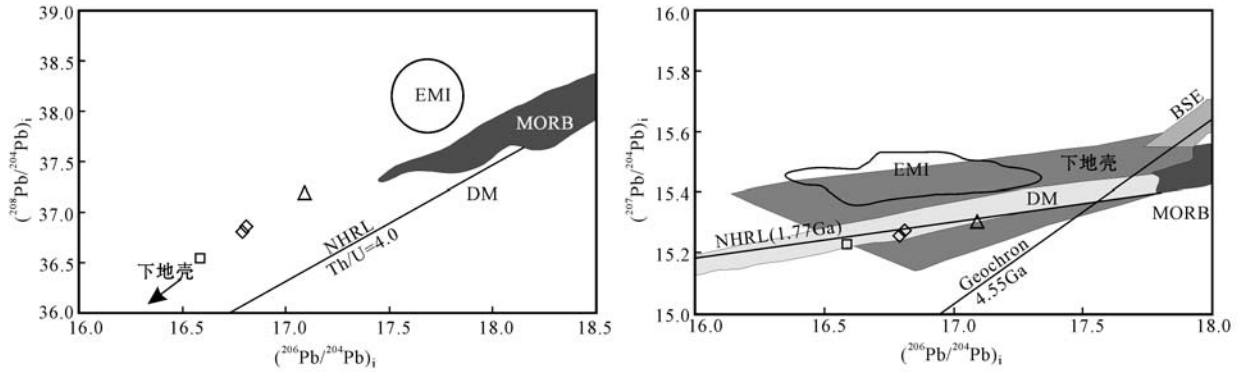


图 10 甲山岩体$(^{208}Pb/^{204}Pb)_i-(^{206}Pb/^{204}Pb)_i$、$(^{207}Pb/^{204}Pb)_i-(^{206}Pb/^{204}Pb)_i$图(图例同图 5)

Fig. 10 $^{206}Pb/^{204}Pb$ versus $^{208}Pb/^{204}Pb$ and $^{206}Pb/^{204}Pb$ versus $^{207}Pb/^{204}Pb$ diagrams of the Jiashan pluton (symbols as for Fig. 5)

MORB、EMI、下地壳、BSE 据梁清玲等(2013); 4.55 Ga 地质年代据 Hart 等(1984)、Barry 和 Kent(1998)、Zou 等(2000)

MORB, EMI, LCC, BSE after Liang Qingling *et al*. (2013); 4.55 Ga geochronologic data after Hart *et al*. (1984), Barry and Kent (1998) and Zou *et al*. (2000)

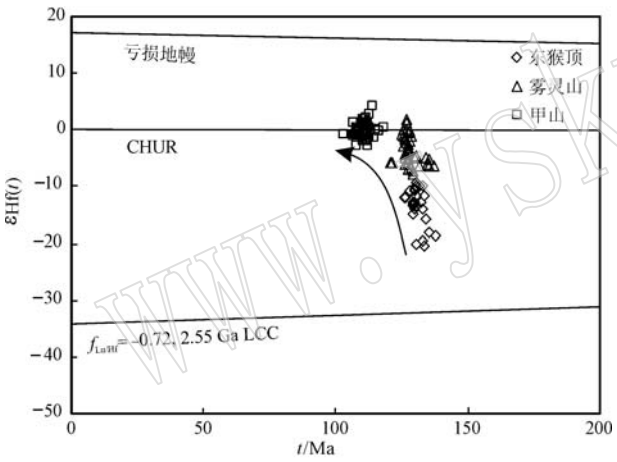


图 11 甲山岩体、东猴顶、雾灵山岩体 $\varepsilon Hf(t)-t$ 图

Fig. 11 Plots of $\varepsilon Hf(t)-t$ for the Jiashan, Donghongding and Wulingshan plutons

东猴顶岩体的 $\varepsilon Hf(t)$据梁清玲等(2013); 雾灵山岩体 $\varepsilon Hf(t)$据陈春良等(2014); 富集地幔据 Yang 等(2006); 太古宙下地壳 Hf 同位素演化线 $f_{Lu/Hf}=-0.72$ 据 Vervoort 和 Patchett(1996)

Donghouding pluton after Liang Qingling *et al*. (2013); Wulingshan plunt after Chen Chunliang *et al*. (2014); the enriched lithospheric mantle after Yang *et al*. (2006); Hf isotopic evolution line $f_{Lu/Hf}=-0.72$ of the Archean lower crust after Vervoort and Patchett (1996)

随着 SiO_2 和 MgO 的增加,$\varepsilon Nd(t)$及$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$无明显变化(图 12),表明在岩浆形成或上升过程中没有受到明显的地壳混染。

一些研究者认为结晶分异可能是 A 型花岗岩岩浆主要演化机制(Collins *et al*., 1982; Clemens *et al*., 1986; Whalen *et al*., 1987; Creaser *et al*., 1991; King *et al*., 1997, 2001)。在哈克图解中,除了 CaO、FeO^T 随着 SiO_2 的增加有降低的趋势(图 13c、13e),说明如辉石、角闪石等钙、镁和铁丰富的矿物质可能发生了分离结晶作用;其余氧化物并没有表现出明显的变化趋势(图 13a、13b、13g、13f)或者极其分散(图 13d、13h)。但随着 SiO_2 的增加及 CaO 的减少,δEu 值逐渐降低(图 14a、14b),表明存在明显的钾长石及斜长石的分离结晶作用。Rb 为不相容元素,在钾长石中可替换 K,其随 SiO_2 含量的增加而增加(图 14c),也表明存在钾长石的分离结晶作用。稀土元素总量随着 SiO_2 含量的增加而升高(图 14d),表明稀土元素分配系数高的矿物发生分离结晶作用,如磷灰石、独居石和榍石,这些都是甲山岩体重要的副矿物。这些都表明在岩浆形成后发生了一定程度的结晶分异作用。

5.3 地球动力学背景

根据本文获得的数据,相对于东猴顶岩体和雾灵山岩体,甲山岩体明显具有较高的 $\varepsilon Hf(t)$值,反映了其成岩物质来源可能具有更多的亏损地幔成分,而且从东猴顶岩体和雾灵山岩体侵位时代 129、127 Ma 到甲山岩体 110 Ma,其 $\varepsilon Hf(t)$值从 -20.5 到 4.3,具有由低到高的变化趋势(图 11),可能反映了华北克拉通北缘岩石圈在早白垩世减薄至最薄,亏损软流圈物质不但为岩浆作用提供热源,且作为物质来源参与岩浆作用。

华北克拉通北缘早白垩世 A 型花岗岩为非造山

www.yskw.ac.cn

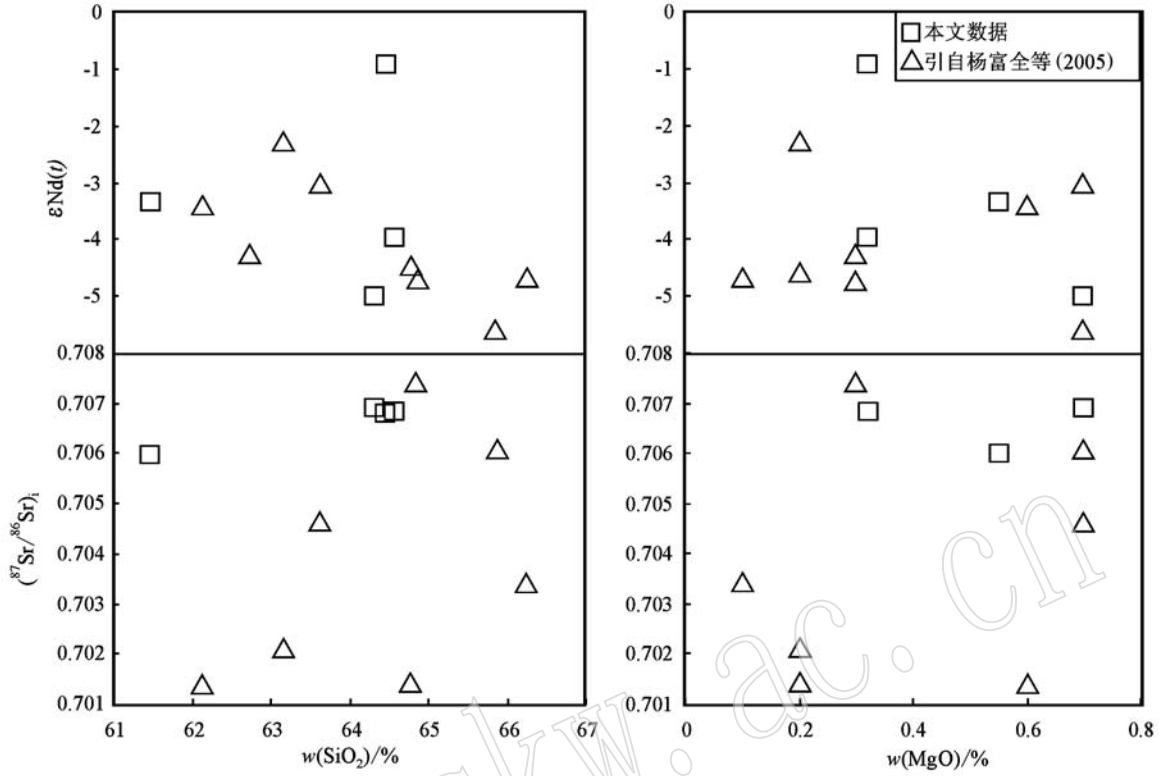


图 12　甲山岩体 εNd(t) - SiO_2、εNd(t) - MgO、$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ - SiO_2、$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ - MgO 图

Fig. 12　Plots of εNd(t) value versus SiO_2, εNd(t) value versus MgO, initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio versus SiO_2 and initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio versus MgO for the Jiashan pluton

花岗岩，其形成与同期中国东部裂谷相关，并可能与古太平洋板块俯冲相关(Wu *et al*.，2002)。杨进辉等(2008)认为早白垩世期间华北克拉通大规模破坏，整个华北东部岩石圈强烈减薄，地幔性质发生转变，古太平洋板块的俯冲可能在这个过程中发挥了关键作用(Sun *et al*.，2007；Xu *et al*.，2009)。最初的破坏产生不规则通道，软流圈地幔沿此通道上涌(Zheng *et al*.，2007)，即早白垩世古太平洋板块俯冲造成了强烈的岩石圈伸展、软流圈上涌，导致伸展构造和岩浆活动在地壳浅部层次的发展。甲山岩体就是在区域伸展环境下，亏损地幔物质上涌、底侵，使得下地壳发生部分熔融，由两种不同来源的岩浆混合形成的。早白垩世甲山岩体形成过程中亏损地幔物质的参与指示了软流圈地幔上涌和华北克拉通北缘岩石圈减薄，其记录了陆内伸展环境下与软流圈底侵作用相关的岩浆事件。

6　结论

(1) 甲山岩体侵位于早白垩世晚期，111～108 Ma 代表该岩体的结晶年龄。

(2) 野外地质观察、实验岩石学以及元素地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素示踪结果表明，甲山岩体可能起源于下地壳与亏损地幔的混合源区，是华北克拉通北缘中生代岩石圈强烈减薄、地壳伸展作用的结果。岩浆在上升过程中没有受到明显的地壳物质混染，但经历了一定程度的分离结晶作用。

(3) 甲山岩体形成过程中亏损地幔物质的参与指示了华北克拉通北缘岩石圈减薄和软流圈地幔上涌，其记录了陆内伸展环境下与软流圈底侵作用相关的岩浆事件。

www.yskw.ac.cn

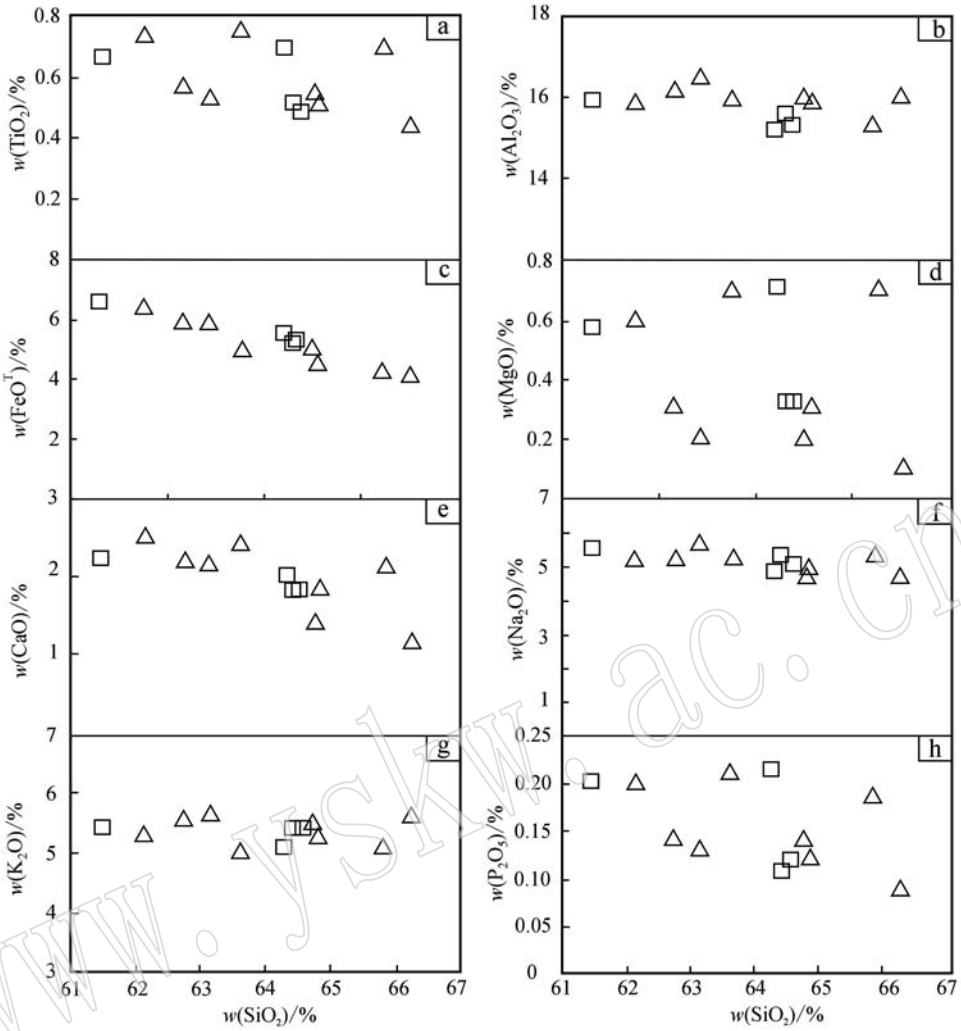


图 13 甲山岩体主量元素哈克图解(图例同图 12)

Fig. 13 Harker diagrams of the main elements of the Jiashan pluton (symbols as for Fig. 12)

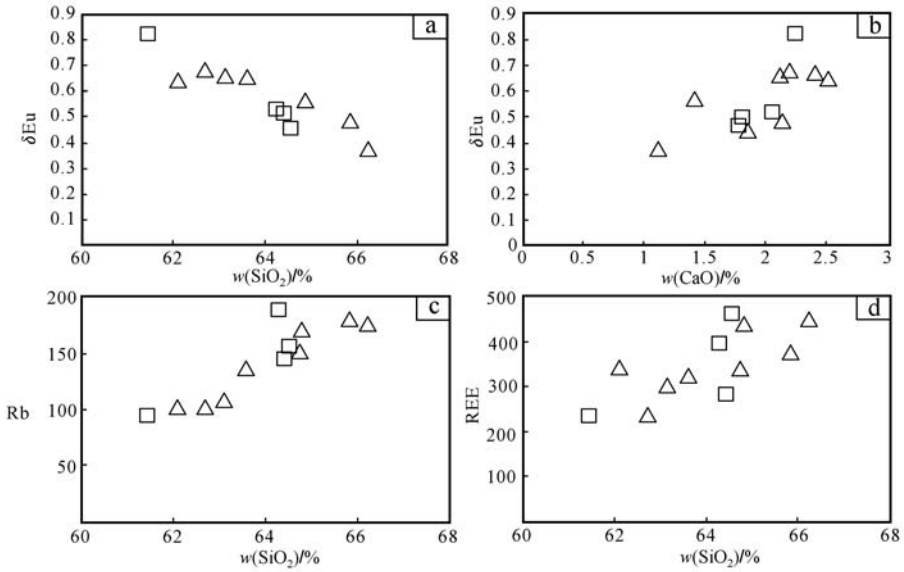


图 14 甲山岩体微量元素哈克图解(图例同图 12)

Fig. 14 Harker diagrams of trace elements of the Jiashan pluton (symbols as for Fig. 12)

www.yskw.ac.cn

References

Barry T L and Kent R W. 1998. Cenozoic magmatism in Mongolia and the origin of central and east Asian basalts[A]. Flower M F J, Chung S L, Lo C H, *et al*. Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia[C]. Geodynamics Series, American Geophysical Union, 347～364.

Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. Lithos, 97: 1～29.

Chen Bin, Jahn B M, Wilde S, *et al*. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications[J]. Tectonophysics, 328 (1～2): 157～182.

Chen B, Tian W, Jahn B M, *et al*. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages and in-situ Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusions in South Taihang, North China craton: Evidence for hybridization between mantle-derived magmas and crustal components[J]. Lithos, 102: 118～137.

Chen Bin and Zhai Mingguo. 2003. Geochemistry of late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle[J]. Geol. Mag., 140: 87～93.

Chen Chunliang, Jiang Sihong, Liang Qingling, *et al*. 2014. The Hf Isotopic Characteristics of the Zircons from Wulingshan Complex in Hebei and Regional Comparative Study[J]. Modern Geology, 28 (4): 663～673(in Chinese with English abstract).

Clemens J D, Holloway J R and White A J R. 1986. Origin of A-type granites: Experimental constraints[J]. Am. Mineral, 71: 317～324.

Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al*. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeasternAustralia [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 80: 189～200.

Creaser R A, Price R C and Wormald R J. 1991. A-type granites revisited: Assessmentofa residual source model[J]. Geology, 19: 163～166.

Davis G A, Zheng Yadong, Wang Cong, *et al*. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China[J]. Geological Society of America Memoirs, 194: 171～198.

Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, *et al*. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70(18): A158.

Fan Weiming and Menzies M A. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China [J]. Geotect. Metallogen, 16: 171～179.

Fan Weiming, Zhang Hongfu, Baker J, *et al*. 2001. On and off the North China craton: where is the Archean keel[J]. Petrol., 41: 933～950.

Gao Shan, Rudnick R L, Carlson R W, *et al*. 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 198: 307～322.

Hart S R. 1984. A large-scale isotopic anomaly in the Southern Hemisphere mantle[J]. Nature, 309: 753～757.

Hou Kejun, Li Yanhe and Tian yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. Mineral Deposits, 28(4): 481～492(in Chinese with English abstract).

Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al*. 2007. Laser ablation-Mc-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2 595～2 604(in Chinese with English abstract).

Jahn B M, Wu Fuyuan, Lo C H, *et al*. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. Chemical Geology, 157: 119～146.

Jia Xiaojun, Wang Qiang and Tang Gongjian. 2009. A-type granites: Research progress and implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 33(3): 465～480(in Chinese with English abstract).

King P L, Chappell B W, Allen C M, *et al*. 2001. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite[J]. Aust. J. Earth Sci., 48: 501～514.

King P L, White A J R and Chappell B W. 1997. Characterization and origin of aluminous A type granites of the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[J]. J. Petrol., 36: 371～391.

Liang Qingling, Jiang Sihong and Liu Yifei. 2013. 2013. Petrogenesis of the Donghouding A-type granite in northern Hebei: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic composition[J]. Geological Review, 56(6): 1 119～1 130(in Chinese with English abstract).

Liu Dunyi, Nutman A P, Compston W, *et al*. 1992. Remnants of 3800 Ma crust in Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. Geology, 20: 339～342.

Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, *et al*. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257: 34～43.

Ludwig K R. 2001a. Squid 1. 02. A user manual[A]. Berkeley

www.yskw.ac.cn

Geochronological Center Special[C]. Berkeley, 1～219.

Ludwig K R. 2001b. Using Isoplot/EX, version 2.49. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[A]. Berkeley Geochronological Center Special Publiction[C]. Berkeley, 1～55.

Menzies M A, Fan Weiming and Zhang Ming. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobe and the loss of ＞120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean Craton, China[A]. Prichard H M, Alabaste T, Harris N B W, *et al*. Magmatic Processes and Plate Tectonic: Geological Society Special Publication 76 [C], 71～81.

Menzies M, Xu Yigang, Zhang Hongfei, *et al*. 2007. Integration of geology, geophysics and geochemistry: a key to understanding the North China Craton[J]. Lithos, 96: 1～21.

Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al*. 2008. Zircon M257-a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 32: 247～265.

Qiu Jiansheng, McInnes Brent I A, *et al*. 2005. Geochemistry of the Minkengshan pluton in Huichang County, Jiangxi Province and new recognition about its genetic type[J]. Geochimica, 34(1): 20～32 (in Chinese with English abstract).

Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Satoshi Kanisawa, *et al*. 2000. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province[J]. Geochimica, 29(4): 313～321(in Chinese with English abstract).

Sláma J, Kosler J, Condon D J, *et al*. 2008. Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 249: 1～35.

Sun Jinfeng and Yang Jinhui. 2009. Early Cretaceous A-type granites in the eastern North China Block with relation to destruction of the craton[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 34(1): 137～147(in Chinese with English abstract).

Sun Shuqin, Zhang Chengjiang and Zhao Songjiang. 2007. Identification of the tectonic settings for continental intraplate by trace elements [J]. Geotectonica et Metallogenia, 31(1): 104～109(in Chinese with English abstract).

Sun S S and Mcdonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society Special Publications, 42(1): 313～345.

Sun Weidong, Ding Xing, Hu Yanhua, *et al*. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific[J]. Earth and Planetary Science Letters, 262: 533～542.

Tian Wei, Chen Bin and Liu Chaoqun. 2007. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the Xiao Zhangjiakou ultrarnafic pluton in northern Heibei[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(3): 583～590(in Chinese with English abstract).

Vervoort J D and Patchett P J. 1996. Behaviour of hafnium and neodymium isotopes in the crust: constraints from Precambrian crustally derived granites[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 60: 3 717～3 733.

Wang Yuejun, Fan Weiming, Zhang Hongfu, *et al*. 2006. Early Cretaceous gabbroic rocks from the Taihang Mountains: Implications for a paleo subduction-related lithospheric mantle beneath the central North China Craton[J]. Lithos, 86: 281～302.

Wei Chunsheng, Zheng Yongfei, Zhao Zifu, *et al*. 2002. Oxygen and neodymium isotope evidence for recycling of juvenile crust in northeast China[J]. Geology, 30: 375～378.

Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407～419.

Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, *et al*. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. Earth Planet. Sci. Lett, 233: 103～119.

Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huimin, *et al*. 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. Chemical Geology, 187: 143～173.

Wu Fuyuan, Walker R J, Ren X W, *et al*. 2003. Osmium isotopic constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern China [J]. Chem. Geol., 196: 107～129.

Wu Fuyuan, Xu Yiguang, Gao Shan, *et al*. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 24: 1 145～1 174.

Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon U-Pb age and its interpretation constraints[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1 589～1 604(in Chinese with English abstract).

Xu Baoliang, Wand Shiguang, Han Baofu, *et al*. 1998. A-type granites with the character of enrichment and loss with particular reference to both suites of the Yanshan, North China and Wulunguhe, Northwest China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 34(2～3): 352～362(in Chinese with English abstract).

Xu Baoliang, Yan Guohan, Huang Fusheng, *et al*. 1994. A-type granites with the character of enrichment and loss with particular reference to both suites of the Yanshan, North China and Wulunguhe, Northwest China [J]. Acta Scientiarun Naturalium Universitatis Pekinensis, 30(6): 703～716(in Chinese with English abstract).

Xu Yiguang, Li Hongyan, Pang Chongjin, *et al*. 2009. On the timing and duration of the destruction of the North China Craton[J]. Chinese Science Bulletin, 54: 3 379～3 396.

Yang Fuquan and Li Yan. 1997. Division of the lithologic unit series and

www.yskw.ac.cn

characteristics of geochemistry of the syenite intrusive bodies[J]. Journal of Xi'an College of Geology, 19(1): 43～47, 62(in Chinese with English abstract).

Yang Fuquan, Wu Hai, Liu Xiaowen, *et al*. 2003. The Jiashan syenite in northern Hebei: an early record of lithospheric thinning in the Yanshan intracontinental orogenic Belt[J]. Geological Review, 49(5): 474～485(in Chinese with English abstract).

Yang Fuquan, Wu Hai, Liu Xiaowen, *et al*. 2005. Mineralogy, geochemical and Sr and Nd isotopic characteristics of the Jiashan syenite in northern Hebei[J]. Geoscience, 19(4): 522～530(in Chinese with English abstract).

Yang Jinhui, Chung Sunlin, Zhai Mingguo, *et al*. 2004a. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle[J]. Lithos, 73: 145～160.

Yang Jinhui and Wu Fuyuan. 2009. Triassic magmatism and craton destruction in the eastern North China Craton[J]. Science in China Series D, Earth Sciences, 39(7): 910～920(in Chinese with English abstract).

Yang Jinhui and Wu Fuyuan. 2009. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the Eastern North China Craton[J]. Science in China, Series D: Earth Sciences, 52: 1 319～1 330.

Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al*. 2004b. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, northeast China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68: 4 469～4 483.

Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al*. 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. Lithos, 89: 89～106.

Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A, *et al*. 2007. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton[J]. Chemical Geology, 242: 155～175.

Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A, *et al*. 2008. Petrogenesis of an alkali syenite-granite-rhyolite suite in the Yanshan fold and thrust belt, eastern North China Craton: geochronological, geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic evidence for lithospheric thinning[J]. Journal of Petrology, 49: 315～351.

Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Zhong Sunlin, *et al*. 2008. The extensional geodynamic setting of Early Cretaceous granitic intrusions in the eastern North China Craton: Evidence from laser ablation $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of K-bearing mineralas[J]. Acta Geologica Sinica, 24(6): 1 175～1 184(in Chinese with English abstract).

Zhang Changhou, Deng Hongling, Li Chengming, *et al*. 2012. An out-of syncline thrust model for the "Chengde Thrust Sheet" in central intraplate Yanshan Orogenic Belt, northern North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 19(5): 27～40.

Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, *et al*. 2005. Geochemical constraints on the origin of Mesozoic alkaline intrusive complexes from the North China Craton and tectonic implications[J]. Lithos, 81: 297～317.

Zhang Hongfu, Ying Jifeng, Shimoda G, *et al*. 2007. Importance of melt circulation and crust-mantle interaction in the lithospheric evolution beneath the North China Craton: evidence from Mesozoic basalt-borne clinopyroxene xenocrysts and pyroxenite xenoliths[J]. Lithos, 96: 67～89.

Zhang Hongfu, Ying Jifeng, Xu Ping, *et al*. 2004. Mantle olivine xenocrysts entrained in Mesozoic basalts from the North China craton: implication for replacement process of lithospheric mantle[J]. Chin. Sci. Bull., 49: 961～966.

Zhao Guochun, Cawood P A, Wilde S A, *et al*. 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 103: 55～88.

Zhao Guochun, Wilde S A, Sun Min, *et al*. 2008. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Lüliang Complex: implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen[J]. Precambrian Research, 160: 213～226.

Zheng Jianping. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 126(in Chinese).

Zheng Jianping, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al*. 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71: 5 203～5 225.

Zheng Yaolong, Davis G A, Wang Cong, *et al*. 2000. Major Mesozoic tectonic events in the plate tcetonic setting[J]. Acta Geologica Sinica, 74(4): 289～302(in Chinese with English abstract).

Zou Haibo, Zindler A, Xu Xisheng, *et al*. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance[J]. Chemical Geology, 171: 33～47.

附中文参考文献

陈春良，江思宏，梁清玲，等. 2014. 河北雾灵山杂岩体锆石 Hf 同位素特征及其区域对比研究[J]. 现代地质，28(4)：663～673.

www.yskw.ac.cn

侯可军，李延河，田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质，28(4)：481～492.

侯可军，李延河，邹天人，等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报，23(10)：2 595～2 604.

贾小君，王 强，唐功建. 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. 大地构造与成矿学，33(3)：465～480.

梁清玲，江思宏，刘翼飞. 2013. 冀北东猴顶 A 型花岗岩成因：岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素制约[J]. 地质论评，56(6)：1 119～1 130.

邱检生，Mcinnes B IA. 蒋少涌，等. 2005. 江西会昌密坑山岩体的地球化学及其成因类型的新认识[J]. 地球化学，34(1)：20～32.

邱检生，王德滋，蟹泽聪史，等. 2000. 福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因[J]. 地球化学，29(4)：313～321.

孙金凤，杨进辉. 2009. 华北东部早白垩世 A 型花岗岩与克拉通破坏[J]. 地球科学——中国地质大学学报，34(1)：137～147.

孙书勤，张成江，赵松江. 2007. 大陆板内构造环境的微量元素判别[J]. 大地构造与成矿学，31(1)：104～109.

田 伟，陈 斌，刘超群. 2007. 冀北小张家口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报，23(3)：583～590.

吴元保，郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报，49(16)：1 589～1 604.

许保良，王式洸，韩宝福，等. 1998. 富集性和亏损性 A 型花岗岩-以华北燕山和新疆乌伦古河地区岩石为例[J]. 北京大学学报(自然科学版)，34(2～3)：352～362.

许保良，阎国翰，黄福生，等. 1994. 雾灵山 A 型花岗岩系的矿物学特征及成因意义[J]. 北京大学学报(自然科学版)，30(6)：703～716.

杨富全，李 彦. 1997. 河北甲山正长岩体的岩石谱系单位划分及地球化学特征[J]. 西安地质学院学报，19(1)：43～47，62.

杨富全，吴 海，刘晓文，等 2003. 冀北承德甲山正长岩——燕山陆内造山带岩石圈减薄的早期记录[J]. 地质评论，49(5)：474～485.

杨富全，吴 海，刘晓文，等. 2005. 冀北承德甲山正长岩的矿物学、地球化学及 Sr-Nd 同位素特征[J]. 现代地质，19(4)：522～530.

杨进辉，吴福元. 2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏[J]. 中国科学 D 辑：地球科学，39(7)：910～920.

杨进辉，吴福元，钟孙霖，等. 2008. 华北东部早白至世花岗岩侵位的伸展地球动力学背景：激光 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学证据[J]. 岩石学报，24(6)：1175～1184.

张长厚，邓洪菱，李程明，等. 2012. 燕山板内造山带中部“承德逆冲构造”的褶皱相关断裂构造模型[J]. 地学前缘，19(5)：27～40.

郑亚东，Davis G A，王 琼，等. 2000. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J]. 地质学报，74(4)：289～302.

www.yskw.ac.cn