

doi: 10.3799/dqkx.2011.049

太行山南段西安里早白垩世角闪辉长岩的成因： 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和岩石地球化学证据

王春光, 许文良*, 王 枫, 杨德彬

吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

摘要: 介绍了太行山南段西安里岩体角闪辉长岩的锆石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素以及岩石地球化学资料, 以便对该类岩石的成因给予制约。西安里岩体主要由一套含橄榄石角闪辉长岩—角闪闪长岩—闪长岩构成。角闪辉长岩中的锆石自形程度较高, 内部结构均匀, 呈条痕状吸收, Th/U 值介于 1.44~2.85 之间, 表现出岩浆成因特征, 其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 135~127 Ma 之间, 15 个点的加权平均年龄为 131±1 Ma, 即角闪辉长岩形成于早白垩世; 锆石的 ε_{Hf}(*t*) 值介于 -23.5~-19.2 之间。角闪辉长岩中 SiO₂=50.27%~50.89%, Mg[#]=0.76~0.78, Na₂O/K₂O=2.18~2.37, 富含过渡族元素 Sc (19.2~20.3)×10⁻⁶、Cr (939~1 050)×10⁻⁶、Co (54.6~58.2)×10⁻⁶、Ni (645~718)×10⁻⁶。同时角闪辉长岩相对富含大离子亲石元素 (LILEs, 如 Cs、Ba、Sr) 和轻稀土元素 (LREEs)、强烈亏损高场强元素 (HFSEs, 如 Nb、Ta、Zr、Hf) 和重稀土元素 (HREEs)。结合角闪辉长岩中纯橄岩包体和橄榄石捕虏晶的矿物化学和地球化学研究, 认为西安里角闪辉长岩是拆沉的陆壳物质熔融的熔体与地幔橄榄岩反应的产物。

关键词: 早白垩世; 角闪辉长岩; 岩石成因; 地球化学; 地质年代; 太行山南段。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2011)03-0471-12

收稿日期: 2010-12-18

Petrogenesis of the Early Cretaceous Xi'anli Hornblende-Gabbros from the Southern Taihang Mountains: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotope and Whole-Rock Geochemistry

WANG Chun-guang, XU Wen-liang*, WANG Feng, YANG De-bin

College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract This paper reports zircon U-Pb geochronology, Hf isotope, and whole-rock geochemical data, aimed at constraining the petrogenesis of the hornblende (Hb)-gabbros from the Xi'anli intrusion in the southern Taihang Mountains (Mts.). The intrusion is composed mainly of olivine-bearing Hb-gabbro, Hb-diorite, and diorite. Zircons from the Hb-gabbros display euhedral shape and zonal homogeneous absorption on CL images, and have high Th/U ratio (1.44~2.85), suggesting a magmatic origin. Their²⁰⁶Pb/²³⁸U ages range from 135 to 127 Ma, yielding a mean age of 131±1 Ma (MSWD=6.5, *n*=15), which suggests that the Xi'anli Hb-gabbros were formed in the Early Cretaceous. The ε_{Hf}(*t*) values of selected zircons range from -23.5 to -19.2. The Xi'anli Hb-gabbros have SiO₂=50.27%~50.89%, Mg[#]=0.76~0.78, and Na₂O/K₂O=2.18~2.37, and are enriched in transitional elements such as Sc (19.2~20.3)×10⁻⁶, Cr (939~1 050)×10⁻⁶, Co (54.6~58.2)×10⁻⁶, and Ni (645~718)×10⁻⁶. Moreover, these gabbros are characterized by relative enrichment in large ion lithophile elements (LILEs, such as Cs, Ba, Sr) and light rare earth elements (LREEs), and intensive depletion in high field strength elements (HFSEs, such as Nb, Ta, Zr, Hf) and heavy rare earth elements (HREEs). Combined with the mineralogical and geochemical study of the dunite xenolith and the olivine xenocrysts hosted in the Hb-gabbros, we propose that the Xi'anli Hb-gabbros may have been produced by the reaction of the delaminated lower continental crust-derived melt and mantle peridotite.

Key words: Early Cretaceous; hornblende-gabbro; petrogenesis; geochemistry; geochronology; southern Taihang Mts..

基金项目: 国家自然科学基金(No. 90814003); 教育部高校博士学科点基金(No. 200801830039)。

作者简介: 王春光(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿物学、岩石学和矿床学。*通讯作者: 许文良, E-mail: xuwl@jlu.edu.cn

自从 Kay (1978) 提出高 $Mg^\#$ 安山岩这一概念以来,产于岛弧和大陆边缘地区的高 $Mg^\#$ 安山岩的成因与岩石圈深部作用过程与演化一直是地学领域研究的热点问题之一 (Rogers *et al.*, 1985; Shimoda *et al.*, 1998; Ryuichi, 1999; Tatsumi, 2001; Wang *et al.*, 2002; Mashima, 2009), 目前对其成因的认识主要有: (1) 地幔物质部分熔融形成高 $Mg^\#$ 安山岩 (Wang *et al.*, 2002; Mashima, 2009); (2) 幔源和壳源岩浆混合形成高 $Mg^\#$ 安山岩 (Shimoda *et al.*, 1998; Ryuichi, 1999; Tatsumi, 2001). 近年来, 华北克拉通东部、中部多处发现高 $Mg^\#$ 辉长—闪长质岩石 (彭头平等, 2004; Xu *et al.*, 2004b; Wang *et al.*, 2006; 许文良等, 2006; Xu *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2008), 这些岩石具有高 $Mg^\#$ 、富 Sr、贫 Y、明显的轻重稀土元素分异以及微弱的负 Eu 异常的特征, 这些特征明显不同于原始岩浆分异形成的辉长—闪长质岩石, 而与高 $Mg^\#$ 安山岩的特征相似. 但是与产于岛弧和大陆边缘地区的高 $Mg^\#$ 安山岩相比, 产于大陆内部、具有高 $Mg^\#$ 安山岩成分特征的高 $Mg^\#$ 辉长—闪长质岩石的研究明显薄弱, 这些高 $Mg^\#$ 辉长—闪长质岩石的成因

如何? 它们的形成与大陆岩石圈深部作用过程及演化有何联系? 这些问题一直未能得到解决. 然而, 太行山南段西安里角闪辉长岩—角闪闪长岩以及其中幔源纯橄岩包体和橄榄石捕虏晶的发现为笔者解决上述问题提供了一个良好的范例 (Xu *et al.*, 2010b).

1 地质概况和岩体地质

华北克拉通主要由东部陆块、西部陆块以及此二者之间的古元古代造山带—中部带所构成 (Zhao *et al.*, 2000, 2001) (图 1a). 太行山南段位于华北克拉通中部带之上, 该地区发育一系列中生代岩体 (图 1b), 包括邯郸—邢台地区的符山、固镇、矿山、洪山岩体, 安阳地区的东冶岩体, 以及长治地区的西安里岩体. 这些岩体的岩石组合主要有角闪辉长岩、角闪闪长岩、闪长岩、二长闪长岩二长岩以及正长岩. 本文所研究的西安里岩体位于太行山南段西侧, 近太行山主峰处, 岩体近南北展布 (图 1c), 侵入的围岩为中奥陶统灰岩. 西安里岩体的岩石组合主要为含橄榄石角闪辉长岩—角闪闪长岩—闪长岩, 在含橄榄石角闪辉长岩

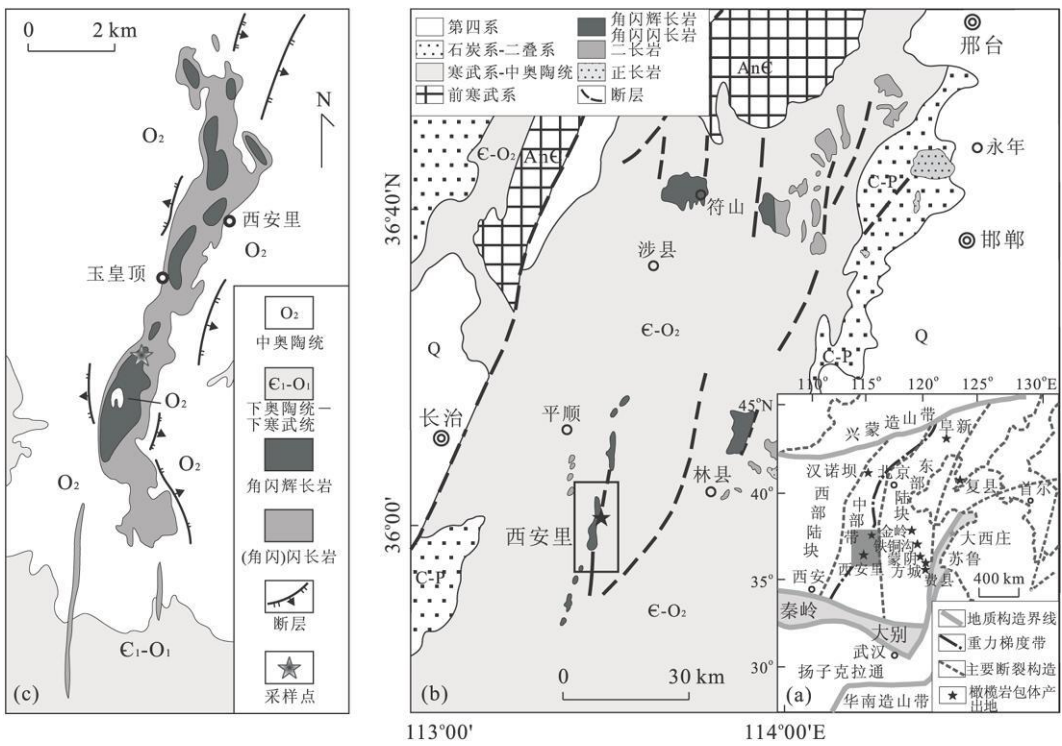


图 1 太行山南段和西安里岩体地质略图

Fig. 1 Geologic sketch map of the southern Taihang Mts. and the Xi'anli intrusion

a. 华北克拉通构造分区简图; b. 太行山南段地质略图; c. 西安里岩体地质略图; 华北克拉通的 3 个基本构造单元: 西部陆块, 中部带和东部陆块 参考 Zhao *et al.* (2001)

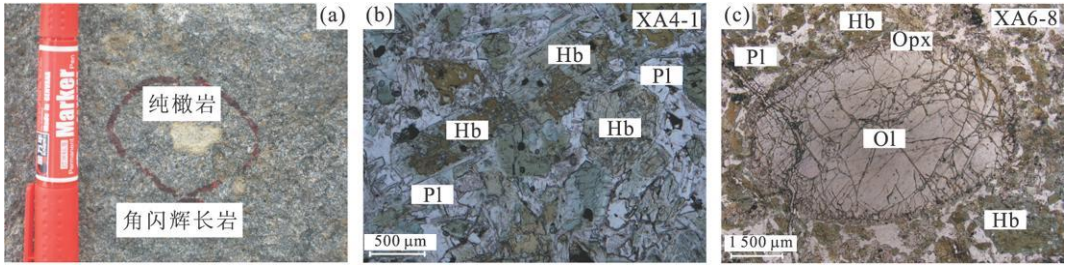


图 2 角闪辉长岩和纯橄岩捕虏体的产状与结构

Fig. 2 Field photographs and photomicrographs showing the occurrence of dunite xenolith and texture of Hb-gabbros

a. 纯橄岩捕虏体的野外产状; b. 角闪辉长岩的似斑状结构(单偏光); c. 角闪辉长岩中橄榄石捕虏晶(单偏光); Hb. 普通角闪石; Ol. 橄榄石; Pl. 斜长石; Opx. 斜方辉石

(简称角闪辉长岩)中发现纯橄岩包体和橄榄石捕虏晶(Xu *et al.*, 2010b)(图 2a, 图 2c).

角闪辉长岩, 新鲜面呈灰绿色, 似斑状结构(图 2a, 图 2b), 块状构造. 主要矿物有普通角闪石(40%~50%), 基性斜长石($An=68\sim81$, 40%~45%), 并含少量橄榄石捕虏晶(3%~5%)(图 2c)及黑云母(2%~3%), 副矿物为磁铁矿、锆石和磷灰石.

2 测试方法

锆石分选在河北廊坊区域地质调查研究所实验室完成, 首先采用常规方法进行粉碎, 并用淘选、电磁选等进行分离, 然后在双目镜下挑选出晶形完好、无明显裂痕且包裹体少的锆石. 将选好的锆石粘贴在环氧树脂表面, 再对其进行剖光露出锆石内部结构. 样品靶的制备和锆石阴极发光(CL)图像的采集在中国科学院地质与地球物理研究所完成.

锆石 U-Pb 同位素定年测试在西北大学大陆动力国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准程序进行. 详细的实验原理和流程见参考文献 Yuan *et al.*(2004). 激光束斑为 30 μm . 实验获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值校正, 以扣除普通 Pb 的影响.

Hf 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所的 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子质谱仪(MC-ICP-MS)上进行, 分析时激光光束直径为 63 μm , 激光剥蚀时间为 26 s. 测定时用国际标样 91500 作外标, 所用的激光脉冲速率为 6~8 Hz, 激光光束脉冲能量为 100 mJ. 仪器的运行条件和详细的分析流程见 Xu *et al.*(2004a). 分析过程中需要对 ^{176}Yb 的干扰进行校正, 校正时采用新的 TIMS 测定值 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5886$ (Chu *et*

al., 2002), 对每个分析点的 β_{Yb} 和 β_{Hf} 实测得出的平均值进行校正.

主量元素分析在中国科学院贵阳地球化学研究所完成, 采用 Axios PW4400 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析, 元素分析的重现性(准确度)优于 3%. 痕量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 Agilent 7500a ICP-MS 完成. 详细的样品消解处理过程、分析精密度和准确度同 Liu *et al.*(2008).

3 锆石 U-Pb 年代学

对西安里角闪辉长岩样品 XA2-1(采样点坐标: $N35^{\circ}58'07''$, $E113^{\circ}30'07''$)中 15 粒锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年. 代表性锆石的 CL 图像如图 3 所示, 其测试结果见表 1, U-Pb 同位素分析数据标定在图 4 中.

从图 3 中可以看出, 西安里角闪辉长岩中的锆石自形程度较高, 内部结构均匀, 呈条带状吸收, 锆

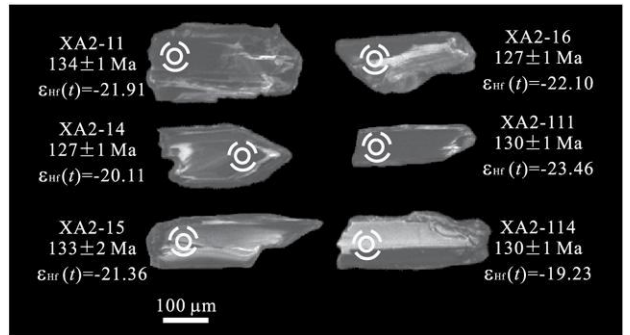


图 3 西安里角闪辉长岩中代表性锆石的阴极发光图像

Fig. 3 CL images of selected zircons from the Xi'anli Hb-gabbro

实线圈代表 U-Pb 年龄分析点, 虚线圈代表 Hf 同位素分析点

表 1 西安里角闪辉长岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data from the Xi'anli Hb-gabbro

点号	元素含量		同位素比值										年龄(Ma)							
	Th(10 ⁻⁶)	U(10 ⁻⁶)	Th/U		207Pb/206Pb		207Pb/235U		208Pb/235U		208Pb/232Th		207Pb/206Pb		207Pb/235U		206Pb/238U		208Pb/232Th	
			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
XA2-11	1 111	525	2.12	0.049 9	0.001 5	0.144 8	0.004 5	0.021 1	0.000 2	0.006 6	0.000 1	190	55	137	4	134	1	133	2	
XA2-12	423	263	1.61	0.051 5	0.002 1	0.147 9	0.006 1	0.021 0	0.000 2	0.006 6	0.000 1	265	74	140	5	134	1	133	2	
XA2-13	1 446	547	2.64	0.048 9	0.001 3	0.136 5	0.003 6	0.020 3	0.000 2	0.006 6	0.000 1	140	47	130	3	129	1	132	2	
XA2-14	979	497	1.97	0.049 0	0.001 6	0.134 8	0.004 5	0.020 0	0.000 2	0.006 4	0.000 1	149	62	128	4	127	1	128	2	
XA2-15	590	298	1.98	0.052 0	0.002 1	0.148 4	0.006 0	0.020 8	0.000 2	0.006 7	0.000 2	283	71	141	5	133	2	135	3	
XA2-16	1 694	708	2.39	0.048 5	0.001 4	0.132 2	0.003 7	0.019 9	0.000 2	0.006 5	0.000 1	122	51	126	3	127	1	130	2	
XA2-17	578	296	1.95	0.051 7	0.001 9	0.149 3	0.005 7	0.020 9	0.000 2	0.006 6	0.000 1	270	72	141	5	133	1	134	2	
XA2-18	920	640	1.44	0.049 7	0.001 4	0.140 3	0.003 8	0.020 4	0.000 2	0.006 7	0.000 1	181	48	133	3	130	1	136	2	
XA2-19	1 569	604	2.60	0.049 9	0.001 5	0.143 4	0.004 1	0.020 8	0.000 2	0.006 7	0.000 1	191	52	136	4	133	1	135	2	
XA2-110	771	463	1.67	0.050 7	0.001 7	0.145 2	0.004 9	0.020 7	0.000 2	0.006 5	0.000 1	226	64	138	4	132	1	131	2	
XA2-111	1 302	581	2.24	0.048 8	0.001 6	0.137 8	0.004 3	0.020 4	0.000 2	0.006 5	0.000 1	139	58	131	4	130	1	131	2	
XA2-112	1 752	615	2.85	0.049 1	0.001 4	0.137 9	0.003 7	0.020 4	0.000 2	0.006 4	0.000 1	154	47	131	3	130	1	130	2	
XA2-113	1 684	638	2.64	0.053 9	0.001 4	0.158 2	0.004 1	0.021 2	0.000 2	0.006 8	0.000 1	365	46	149	4	135	1	137	2	
XA2-114	1 536	554	2.77	0.049 2	0.001 4	0.138 5	0.003 8	0.020 4	0.000 2	0.006 4	0.000 1	156	50	132	3	130	1	129	2	
XA2-115	1 644	692	2.38	0.050 2	0.001 3	0.142 9	0.003 6	0.020 6	0.000 2	0.006 5	0.000 1	206	45	136	3	131	1	130	2	

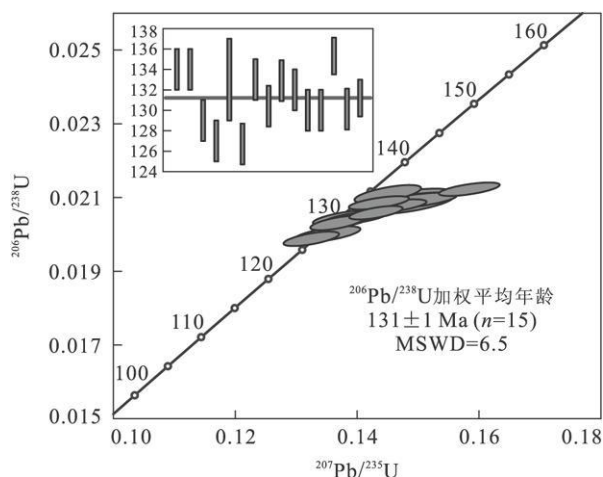


图4 西安里角闪辉长岩中锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagram showing age data derived from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Xi'anli Hb-gabbro

石的 Th/U 比值介于 1.44 ~ 2.85 之间, 锆石的形态、结构特征及其 Th/U 比值表明它们属典型的岩浆成因锆石. 角闪辉长岩中锆石的 U-Pb 年龄比较集中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 135 ~ 127 Ma 之间, 其加权平均值为 131 ± 1 Ma.

4 锆石 Hf 同位素

在进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析的同时, 也对西安里角闪辉长岩样品 XA2-1 相同的锆石进行了原位 Hf 同位素分析, CL 图像见图 3, 分析结果列于表 2, 表 2 中也列出了 Hf 同位素单阶段模式年龄 (T_{DM1}) 和两阶段模式年龄 (T_{DM2}), 对于后者, 由于样品为玄武质岩石, 所以在计算两阶段模式年龄时, 采用镁铁质下地壳的 Lu/Hf 比 ($f_{\text{Lu/Hf}} = -0.34$; Amelin *et al.*, 2000).

从表 2 中可以看出, 15 个点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值比较集中, 介于 0.282 038 ~ 0.282 158 之间. 以角闪辉长岩的成岩年龄 131 Ma 计算, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -23.5 ~ -19.2 之间, 加权平均值为 -21.4 ± 0.7, 两阶段模式年龄的变化范围为 3 716 ~ 3 342 Ma.

5 岩石地球化学

5.1 主量元素

对西安里角闪辉长岩的 3 个样品进行了主量元素分析, 分析结果见表 3. 去除烧失量影响后, 其 SiO_2 质量百分含量介于 50.27% ~ 50.89% 之间,

TiO_2 质量百分含量介于 0.50% ~ 0.63% 之间, Al_2O_3 质量百分含量介于 11.38% ~ 12.16% 之间, MgO 质量百分含量介于 15.62% ~ 16.97% 之间, $\text{Mg}^\# [\text{Mg}^\# = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})]$ 介于 0.76 ~ 0.78 之间, Na_2O 质量百分含量介于 2.42% ~ 2.87% 之间, K_2O 含量介于 1.03% ~ 1.32% 之间, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值介于 2.18 ~ 2.37 之间. 结合先前的研究样品(许文良等, 1993), 在侵入岩 TAS 分类图解上, 样品主要落在亚碱性系列区域, 辉长岩和辉长闪长岩范围之内(图 5). 总的来说, 西安里角闪辉长岩表现出较低的 SiO_2 含量、高 $\text{Mg}^\#$ 和富 Na 的特征.

5.2 微量元素

对上述 3 个样品相应地进行了微量元素分析, 分析结果见表 3. 图 6a 为西安里角闪辉长岩球粒陨石标准化稀土元素(REE) 配分曲线, 从表 3 和图 6a 中可以看出, 角闪辉长岩富含轻稀土元素(LREEs), 贫重稀土元素(HREEs), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 8 ~ 9 之间; δ_{Eu} 值介于 0.98 ~ 0.99 之间, 即具有微弱的负 Eu 异常. 西安里角闪辉长岩与符山高镁闪长岩、鲁西地区的铁铜沟、金岭、上峪辉长—闪长质岩石有着相似的稀土元素配分形式(Yang *et al.*, 2005, 2008; 许文良等, 2009), 但 HREEs 丰度偏低.

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 6b), 西安里角闪辉长岩富含大离子亲石元素(LILEs, Cs, Ba, Sr), 明显亏损高场强元素(HFES, Nb, Ta, Zr, Hf), 同时具有强烈的 Pb 的正异常. 西安里角闪辉长岩与符山高镁闪长岩、鲁西地区铁铜沟、金岭、上峪辉长—闪长质岩石以及方城和费县玄武岩岩相比, 微量元素分布趋势相似(Zhang *et al.*, 2002; 裴福萍等, 2004; Yang *et al.*, 2005, 2008; 许文良等, 2009). 另外, 西安里角闪辉长岩贫 Y (Y 含量介于 13.7×10^{-6} ~ 15.8×10^{-6} 之间), Sr/Y 比值在 42 ~ 47 之间, 在 Sr/Y-Y 变异图解上显示埃达克质岩石的地球化学属性(图 7).

西安里角闪辉长岩的过渡元素 Sc、Cr、Co、Ni 的含量分别是 $(19.2 \sim 20.3) \times 10^{-6}$, $(939 \sim 1050) \times 10^{-6}$, $(54.6 \sim 58.2) \times 10^{-6}$, $(645 \sim 718) \times 10^{-6}$, 岩石的过渡元素含量高于符山高镁闪长岩和鲁西上峪辉长—闪长岩中过渡元素的含量(Yang *et al.*, 2008; 许文良等, 2009), 并且明显高于全国同类岩石的平均值(李昌年, 1992).

表 2 西安里角闪辉长岩中锆石 LA-ICP-MS Hf 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon Hf isotopic data from the Xi'anli Hb-gabbro

分析点号	同位素比值				Hf 同位素成分				模式年龄(Ma)		$f_{Lu/Hf}$	
	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	T_{DM1}	T_{DM2}		
XA2-1-01	0.102 588	0.004 106	0.003 755	0.000 149	0.282 081	0.000 027	-21.9	-24.4	1.0	1 778	3 579	-0.89
XA2-1-02	0.078 659	0.000 610	0.003 154	0.000 020	0.282 110	0.000 027	-20.8	-23.4	1.0	1 706	3 485	-0.90
XA2-1-03	0.098 703	0.000 289	0.003 659	0.000 018	0.282 063	0.000 019	-22.5	-25.1	0.7	1 799	3 634	-0.89
XA2-1-04	0.099 214	0.002 014	0.003 633	0.000 078	0.282 131	0.000 023	-20.1	-22.7	0.8	1 697	3 420	-0.89
XA2-1-05	0.096 487	0.003 006	0.003 560	0.000 112	0.282 096	0.000 028	-21.4	-23.9	1.0	1 746	3 531	-0.89
XA2-1-06	0.103 679	0.001 998	0.003 710	0.000 073	0.282 075	0.000 028	-22.1	-24.6	1.0	1 784	3 597	-0.89
XA2-1-07	0.155 761	0.002 831	0.005 558	0.000 101	0.282 054	0.000 026	-23.0	-25.4	0.9	1 916	3 675	-0.83
XA2-1-08	0.095 313	0.001 018	0.003 580	0.000 036	0.282 146	0.000 025	-19.6	-22.1	0.9	1 672	3 374	-0.89
XA2-1-09	0.112 446	0.000 442	0.003 970	0.000 016	0.282 098	0.000 023	-21.3	-23.9	0.8	1 764	3 528	-0.88
XA2-1-10	0.081 798	0.000 833	0.002 907	0.000 034	0.282 118	0.000 021	-20.5	-23.1	0.8	1 681	3 456	-0.91
XA2-1-11	0.110 841	0.000 298	0.004 015	0.000 021	0.282 038	0.000 021	-23.5	-26.0	0.8	1 856	3 716	-0.88
XA2-1-12	0.089 185	0.000 530	0.003 356	0.000 034	0.282 101	0.000 029	-21.1	-23.7	1.0	1 728	3 513	-0.90
XA2-1-13	0.113 416	0.000 126	0.004 095	0.000 012	0.282 090	0.000 029	-21.6	-24.1	1.0	1 781	3 553	-0.88
XA2-1-14	0.119 968	0.000 263	0.004 372	0.000 007	0.282 158	0.000 030	-19.2	-21.7	1.1	1 692	3 342	-0.87
XA2-1-15	0.098 330	0.000 732	0.003 593	0.000 031	0.282 116	0.000 027	-20.6	-23.2	1.0	1 717	3 468	-0.89

注:表中锆石 Hf 同位素组成的计算参数为: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.865 \times 10^{-11}$ (Soderlund *et al.*, 2004); 球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别为 0.033 21/0.282 772、0.038 42/0.283 25 (Bizzarro *et al.*, 2002; Griffin *et al.*, 2000); 镁铁质下地壳的 $f_{Lu/Hf} = -0.34$ (Amelin *et al.*, 2000); 计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 时, 取角闪辉长岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值 $t = 131$ Ma.

表 3 西安里角闪辉长岩主量元素(%),微量元素(10^{-6})测试结果

Table 3 Major (%), trace-element (10^{-6}) data of the Xi'anli Hb-gabbros

样品编号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	总量	Mg#	$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$
XA4-1	48.74	0.57	11.79	9.21	0.15	15.14	7.06	2.78	1.28	0.24	2.93	99.88	0.77	2.18
XA4-4	48.74	0.61	11.37	9.54	0.16	15.18	7.19	2.36	1.00	0.23	3.56	99.93	0.76	2.37
XA6-18	49.11	0.49	10.98	9.21	0.15	16.38	6.60	2.34	1.06	0.20	3.53	100.03	0.78	2.22
样品编号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr
XA4-1	10.19	0.78	20.2	173	976	54.6	645	52.5	98.5	15.4	25.9	659	15.1	60.1
XA4-4	9.37	0.70	20.3	169	939	54.9	635	44.4	99.1	14.5	18.2	667	15.8	54.0
XA6-18	9.08	0.69	19.2	145	1050	58.2	718	42.1	85.5	13.8	21.4	646	13.7	61.5
样品编号	Nb	Mo	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
XA4-1	3.39	0.34	0.80	575	15.9	36.2	4.82	21.1	4.24	1.33	3.63	0.50	2.77	0.52
XA4-4	3.14	0.57	0.73	433	14.8	33.1	4.50	20.2	4.18	1.32	3.69	0.51	2.89	0.53
XA6-18	3.00	0.51	0.81	504	15.3	33.5	4.35	18.7	3.70	1.13	3.11	0.43	2.43	0.46
样品编号	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	Sr/Y	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	δEu	ΣREE	
XA4-1	1.48	0.22	1.35	0.20	1.78	0.17	6.01	1.26	0.34	43.55	7.92	0.99	94.29	
XA4-4	1.51	0.21	1.29	0.20	1.65	0.16	5.20	1.15	0.31	42.29	7.70	0.99	88.83	
XA6-18	1.35	0.19	1.18	0.18	1.78	0.16	5.40	1.25	0.35	47.12	8.79	0.98	86.05	

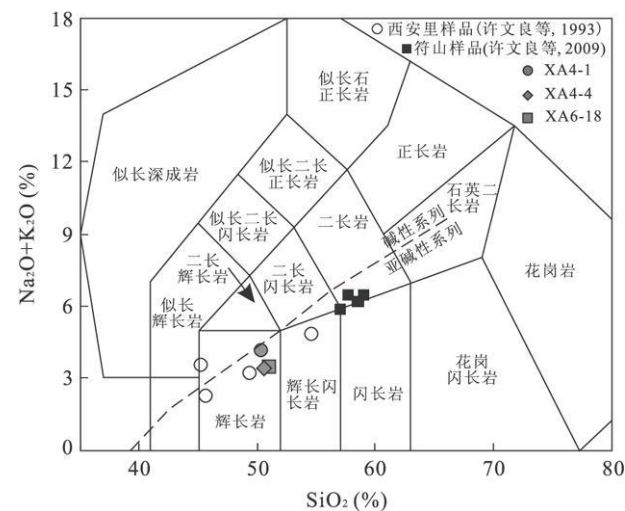


图 5 西安里角闪辉长岩的 TAS 图解
Fig. 5 Total alkali vs. SiO₂ variation diagram for the Xi'anli Hb-gabbros
碱性和亚碱性系列之间的界限引自 Irvine and Baragar (1971)

6 讨论

6.1 西安里角闪辉长岩的形成时代

西安里角闪辉长岩中的锆石自形程度较高, 内部结构均匀, 呈条痕状吸收, 并且具有较高的 Th/U 比值 (1.44~2.85), 表现出岩浆结晶成因锆石的特征, 锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果应代表岩浆结晶的年龄. 锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 135~127 Ma 之间, 15 个点的加权平均年龄为 131±1 Ma, 这表明岩体侵位结晶的时代为早白垩世. 太行山南段符山高镁闪长岩的形成时代为 125±1 Ma (许文良等, 2009); 太行山地区东冶岩体中粒辉长岩的形成时代为 125.2±4.5 Ma (Wang *et al.*, 2006); 东冶岩体

角闪辉长岩的形成时代为 125.9±0.9 Ma (彭头平等, 2004); 太行山北段地区王安镇基性岩的形成时代介于 138~129 Ma 之间 (陈斌等, 2005). 从前人对太行山地区火成岩大量的研究结果中可以看出, 西安里角闪辉长岩和太行山地区其他辉长-闪长质岩石的形成时代都在早白垩世, 这一时代与华北克拉通乃至中国东部中生代最强的一次岩浆事件——早白垩世岩浆活动相吻合 (Xu *et al.*, 2004b, 2004c; Wu *et al.*, 2005, 2007).

6.2 西安里角闪辉长岩成因的地球化学制约

西安里角闪辉长岩的锆石 Hf 模式年龄远大于锆石的形成年龄, 表明其岩浆来源于富集型地幔或受到过地壳物质的混染 (吴福元等, 2007), 更加明显的特征是, 西安里角闪辉长岩富 Na ($Na_2O/K_2O = 2.18 \sim 2.37$), 富 Sr ($646 \times 10^{-6} \sim 667 \times 10^{-6}$), 富含第一过渡族元素 Cr ($939 \times 10^{-6} \sim 1\,050 \times 10^{-6}$), Co ($54.6 \times 10^{-6} \sim 58.2 \times 10^{-6}$), Ni ($635 \times 10^{-6} \sim 718 \times 10^{-6}$), 具有强烈的 Pb 正异常, 强烈亏损 HFSEs (Nb、Ta、Zr、Hf). 锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 -23.5~-19.2 之间, 远低于富集型地幔 (EMI) 的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 (-8~-10, Yang *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2008) (图 8). 另外, 西安里岩体辉长-闪长质岩石晚期样品 (XA1-3) 中存在一些晚太古代和古元古代的继承/捕获锆石 (锆石 U-Pb 年龄为 2 526~2 453 Ma) (未发表资料). 以上特征表明岩浆具有明显的下部陆壳的成分. 然而, 西安里辉长岩的地球化学特征又表现为低 SiO₂ 含量 ($SiO_2 = 50.27\% \sim 50.89\%$), 高 Mg[#] ($Mg^{\#} = 0.76 \sim 0.78$), 这暗示着西安里角闪辉长岩具有以岩石圈地幔为源区的地球化学属性, 并且有实验岩石学研究证明, 高温条件下

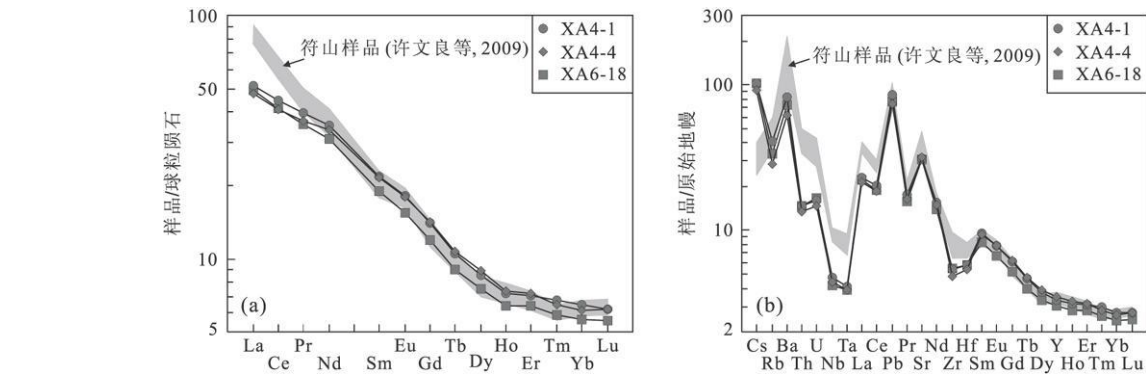


图 6 西安里角闪辉长岩的球粒陨石标准化稀土元素配分型式 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams (b) for the Xi'anli Hb-gabbros
球粒陨石标准化数据引自 Boynton (1984); 原始地幔标准化数据引自 Sun and McDonough (1989)

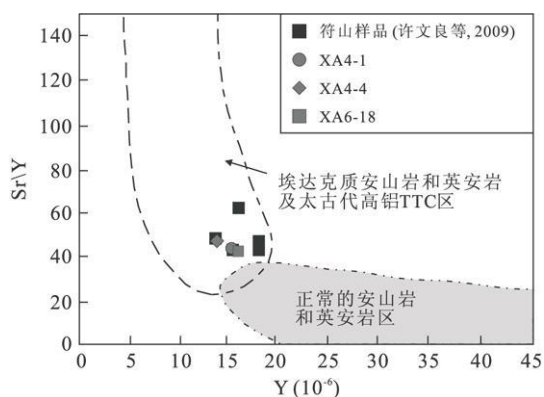


图 7 西安里角闪辉长岩的 Y-Sr/Y 变异图解 (Defant and Kepezhinskas, 2001)

Fig. 7 Y vs. Sr/Y diagram for the Xi'anli Hb-gabbros

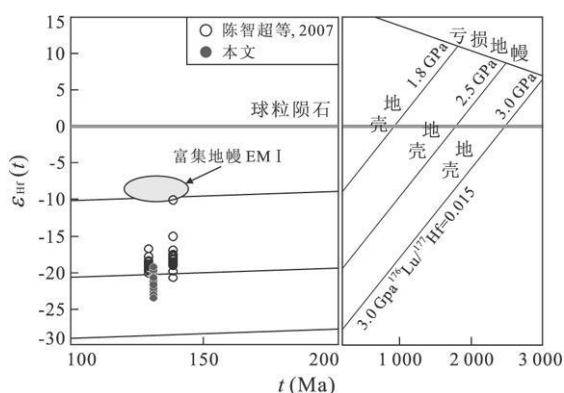


图 8 西安里角闪辉长岩中锆石 Hf 同位素特征 (富集地幔 EM I 区引自 Yang *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2008)

Fig. 8 Zircon Hf isotopic features for the Hb-gabbro from the Xi'anli intrusion

下部陆壳玄武质岩石脱水部分熔融所形成的熔体均以低 $Mg^\#$ 为特征 ($Mg^\# < 42$) (Rapp and Watson, 1995). 因此, 单一的下部陆壳玄武质岩石脱水部分熔融不可能形成角闪辉长岩.

西安里角闪辉长岩的地球化学特征与高 $Mg^\#$ 安山岩相似, 而明显不同于地幔橄榄岩部分熔融产生的玄武质岩浆. 可以推测, 西安里角闪辉长岩岩浆的主体为下部陆壳物质熔融熔体, 但经过与地幔橄榄岩的相互作用后, 具有高 $Mg^\#$ 的特征 (Xu *et al.*, 2008, 2010b).

前人对太行山火成岩的研究在一些方面已经达成共识, 如地球化学特征——低 SiO_2 含量、高 $Mg^\#$ 、富 Na、富集 LILEs 和 LREEs、亏损 HFSEs 和 HREEs 等 (许文良等, 1993; Chen *et al.*, 2004, 2008; Wang *et al.*, 2006; 许文良等, 2009). 但是岩浆如何兼具地幔和陆壳的地球化学成分特征? 其岩浆演化经历了怎

样的过程? 这些问题的答案仍然存在分歧. 然而, 单从岩石的地球化学方面很难给出明确答案. 西安里角闪辉长岩中橄榄岩包体和橄榄石捕虏晶的发现对寄主岩的成因给出了更深层次的制约.

6.3 纯橄岩包体和橄榄石捕虏晶对西安里角闪辉长岩成因的制约

西安里角闪辉长岩中发现纯橄岩包体 (橄榄石体积分数大于 90%) 和橄榄石捕虏晶 (Xu *et al.*, 2010b). 纯橄岩具有板状、原生粒状及碎斑状的结构特征, 包体和寄主岩的接触处出现斜方辉石带, 纯橄岩中的铬铁矿在 BSE 图像上呈现出成分分带. 橄榄石捕虏晶呈浑圆状, $4\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, 具有扭折带, 且可见成分分带以及斜方辉石反应边 (图 2c).

纯橄岩包体中橄榄石具有较高的 $Mg^\#$ (平均 $Mg^\# = 90$)、低 CaO 含量 ($CaO < 0.1\%$), 发育变形结构, 这与岩浆堆积成因观点不相符合. 再者, 与符山、铁铜沟的方辉橄榄岩、二辉橄榄岩中的橄榄石相比, 西安里纯橄岩包体橄榄石的 $Mg^\#$ 和 Ni 含量低, Ca、Ti、Cr 含量高 (Xu *et al.*, 2008, 2010a; 许文良等, 2009), 这又与纯橄岩是地幔岩石高程度部分熔融的观点不相符合. 但是, 这些特征与熔体—橄榄岩反应的成因观点相吻合, 即纯橄岩形成于强烈的硅质熔体—橄榄岩反应, 并且具有高的熔体—橄榄岩比例 (Xu *et al.*, 2010b). 同时, 西安里角闪辉长岩中的橄榄石捕虏晶具有相对较高的 $Mg^\#$ (核部 $Mg^\# = 91 \sim 94$), 低的 CaO 含量 ($CaO < 0.1\%$), 结合橄榄石核部、边部与寄主岩浆之间 Fe-Mg 分配系数的计算以及其岩相学特征, 可以确定: 这些橄榄石与岩浆成因的橄榄石斑晶不同, 是地幔捕虏晶, 并且也经历了与寄主岩浆的反应 (Xu *et al.*, 2010b). 有实验证明, 熔体与橄榄岩反应, MgO 、 SiO_2 和 Ni 从橄榄石扩散到熔体中, 造成熔体 $Mg^\#$ 和 Ni 含量的升高 (Morgan and Liang, 2003, 2005).

西安里纯橄岩包体和橄榄石捕虏晶的发现及其岩相学、矿物化学的研究结果不仅证实了笔者前面的推测, 而且使笔者得出进一步论断: 造成西安里角闪辉长岩特殊地球化学特征的原因是下部陆壳部分熔融的熔体与地幔橄榄岩的反应.

6.4 高 $Mg^\#$ 辉长闪长岩的成因——拆沉陆壳熔融的熔体与地幔橄榄岩反应

目前, 对于华北克拉通的破坏机制主要有拆沉作用和热—化学侵蚀作用两种观点. 前者强调加厚陆壳物质因其较大的密度而拆沉到软流圈, 是自上而下的过程 (Gao *et al.*, 2004); 后者强调来自软流圈的玄武

质熔体对岩石圈地幔底部的热侵蚀和化学侵蚀,是自下而上的过程(Xu, 2001)。甄别这两种机制的关键标志是,看岩石圈地幔橄榄岩是被起源于陆壳物质熔融的熔体改造还是被来自于软流圈的玄武质熔体改造。对火成岩中具有幔源成因的橄榄石捕虏晶和橄榄岩包体性质的研究是鉴别上述机制的关键。

西安里角闪辉长岩中橄榄石捕虏晶和纯橄岩包体中橄榄石的核部成分与符山高镁闪长岩中二辉橄榄岩、方辉橄榄岩中的橄榄石相似(Xu *et al.*, 2010b),后者具有新太古代到古元古代的 Re-亏损模式年龄(刘勇胜,未发表资料),代表了古老岩石圈地幔的残留;而橄榄石捕虏晶从核部到边部成分的变化表明,它们经历了熔体的改造;纯橄岩包体中橄榄石的矿物化学表明(如从核部到边部,不相容元素 Ca、Ti、Mn 含量的增高),该类捕虏体是熔体—橄榄岩反应的产物,而非堆积成因(Xu *et al.*, 2010b);纯橄岩包体与二辉橄榄岩和方辉橄榄岩一起,均显示低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-15.4 \sim -23.6$),表明它们经历了起源于下部陆壳物质熔融的熔体的改造(Xu *et al.*, 2010b)。综合上述特征,可以判断,研究区曾发生过加厚陆壳的拆沉作用。并且,这一看法可以从研究区所处的构造位置与区域构造演化中得到印证。

首先,太行山南段位于华北克拉通中部带之上,后者是一条形成于 1.85 Ga 左右的造山带,代表了古元古代华北克拉通东部块体和西部块体的俯冲碰撞(Zhao *et al.*, 1999, 2000, 2001)。陆块间碰撞的造山过程中,岩石圈加厚,造山带下部地壳形成榴辉岩(高山和金振民, 1997; Gao *et al.*, 2009),榴辉岩的密度明显大于岩石圈地幔(Rudnick and Fountain, 1995; Anderson, 2005),使其具有重力不稳定性。于是,在重力的驱动之下,冷的、密度大的下部陆壳物质拆沉至热的、浮力强的软流圈(Rudnick, 1995; 高山和金振民, 1997; Gao *et al.*, 2009),这样就为熔融产生熔体提供了物质来源。

其次,早白垩世,古太平洋板块向欧亚大陆下斜向俯冲(Maruyama and Send, 1986),古老洋壳的俯冲拆沉使华北克拉通之下的软流圈乃至下部地幔发生强烈的扰动,受到搅动而上涌的软流圈以及下地幔物质携带大量的热,使华北克拉通中部带拆沉的下部陆壳物质发生部分熔融,并且上涌物质与拆沉物质有可能发生一定程度的混融,从而形成了用以进行与上地幔橄榄岩反应的熔体。

因此,熔体通过岩石圈地幔的岩浆通道上升并捕获上地幔橄榄岩,在上升过程中熔体与所捕获的

橄榄岩发生反应(Kelemen *et al.*, 1995, 1998; Morgan and Liang, 2005),反应以高熔体/橄榄岩比例为特征(熔体/橄榄岩 ≥ 1 , Becker *et al.*, 2001),最终形成了西安里角闪辉长岩,并将地幔橄榄岩改造成笔者所见到的纯橄岩包体和橄榄石捕虏晶。

7 结论

基于西安里角闪辉长岩锆石的 U-Pb 定年结果和岩石地球化学研究,笔者得出如下结论:

(1) 西安里角闪辉长岩中锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为 135 ~ 127 Ma 之间加权平均值为 131 ± 1 Ma, 其形成时代为早白垩世。

(2) 角闪辉长岩的地球化学特征,结合其中的纯橄岩包体和橄榄石捕虏晶的研究,认为西安里角闪辉长岩是拆沉陆壳物质熔融的熔体与地幔橄榄岩反应的产物。

致谢:衷心感谢河北省廊坊区域地质调查研究所实验室在样品分离和挑选过程中给予的帮助,同时感谢西北大学大陆动力学国家重点实验室、中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室、中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室在锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年以及主量元素、痕量元素和锆石 Hf 同位素分析中给予的支持。

References

- Amelin, Y., Lee, D. C., Halliday, A. N., 2000. Early-middle archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24): 4205–4225. doi: 10.1016/S0016-7037(00)00493-2
- Anderson, D. L., 2005. Large igneous provinces, delamination, and fertile mantle. *Elements*, 1(5): 271–275. doi: 10.2113/gselements.1.5.271
- Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Becker, H., Shirey, S. B., Garlson, R. W., 2001. Effects of melt percolation on the Re-Os systematics of peridotites from a Paleozoic convergent plate margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(1–2): 107–121. doi: 10.1016/S0012-821X(01)00308-9
- Bizzarro, M., Simonetti, A., Stevenson, R. K., et al., 2002. Hf isotope evidence for a hidden mantle reservoir. *Geol-*

- ogy, 30(9): 771—774. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0771:HIEFAH>2.0.CO;2
- Boynnton, W. V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteoric studies. In: Henderson, P., ed., Rare earth element geochemistry. Elsevier Science Publishing Company Inc., New York.
- Chen, B., Jahn, B. M., Arakawa, Y., et al., 2004. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang orogen, North China craton: elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(4): 489—501. doi: 10.1007/s00410-004-0620-0
- Chen, B., Tian, W., Jahn, B. M., et al., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb ages and insitu Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusions in South Taihang, North China craton: evidence for hybridization between mantle-derived magmas and crustal components. *Lithos*, 102(1—2): 118—137. doi: 10.1016/j.lithos.2007.06.012
- Chen, B., Tian, W., Zhai, M. G., et al., 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 13—24 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. C., Chen, B., Tian, W., 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic compositions and geological significance: a case study of Mesozoic batholiths and mafic enclaves in North Taihang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 295—306 (in Chinese with English abstract).
- Chu, N. C., Taylor, R. N., Chavagnac, V., et al., 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(12): 1567—1574.
- Defant, M. J., Kepezhinskas, P., 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(6): 65, 68—69. doi: 10.1029/01EO00038
- Gao, S., Jin, Z. M., 1997. Delamination and its geodynamical significance for the crust mantle evolution. *Geological Science and Technology Information*, 16(1): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892—897. doi: 10.1038/nature03162
- Gao, S., Zhang, J. F., Xu, W. L., et al., 2009. Delamination and destruction of the North China craton. *Chinese Science Bulletin*, 54(19): 3367—3378. doi: 10.1007/s11434-009-0395-9
- Griffin, W. L., Pearson, N. J., Belousova, E., et al., 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133—147. doi: 10.1016/S0016-7037(99)00343-9
- Irvine, N. T., Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523—548. doi: 10.1139/e71-055
- Kay, R. W., 1978. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1—2): 117—132. doi: 10.1016/0377-0273(78)90032-X
- Kelemen, P. B., Hart, S. R., Bernstein, S., 1998. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 164(1—2): 387—406. doi: 10.1016/S0012-821X(98)00233-7
- Kelemen, P. B., Shimizu, N., Salters, V. J. M., 1995. Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels. *Nature*, 375: 747—753. doi: 10.1038/375747a0
- Li, C. N., 1992. Trace element petrology of igneous rocks. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Maruyama, S., Send, T., 1986. Orogeny and relative plate motion: example of the Japanese islands. *Tectonophysics*, 127(3—4): 305—329. doi: 10.1016/0040-1951(86)90067-3
- Mashima, H., 2009. Genesis of high-magnesium andesites and associated basalts from Saga-Futagoyama, Northwest Kyushu, Southwest Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 187(1—2): 106—116. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.07.021
- Morgan, Z., Liang, Y., 2003. An experimental and numerical study of the kinetics of harzburgite reactive dissolution with applications to dunite dike formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 214(1—2): 59—74. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00375-3
- Morgan, Z., Liang, Y., 2005. An experimental study of the kinetics of lherzolite reactive dissolution with applications to melt channel formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150(4): 369—385. doi: 10.1007/s00410-005-0033-8

- Pei, F. P., Xu, W. L., Wang, Q. H., et al., 2004. Mesozoic basalt and mineral chemistry of the mantle-derived xenocrysts in Feixian, western Shandong, China: constraints on nature of Mesozoic lithospheric mantle. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 88—97 (in Chinese with English abstract).
- Peng, T. P., Wang, Y. J., Fan, W. M., et al., 2004. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the diorites for southern Taihang Mountains in the North China interior and its petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1253—1262 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8—32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891—931.
- Rogers, G., Saunders, A. D., Terrell, D. J., et al., 1985. Geochemistry of Holocene volcanic rocks associated with ridge subduction in Baja California, Mexico. *Nature*, 315: 389—392. doi: 10.1038/315389a0
- Rudnick, R. L., 1995. Making continental crust. *Nature*, 378: 571—578. doi: 10.1038/378571a0
- Rudnick, R. L., Fountain, D. M., 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, 33(3): 267—309. doi: 10.1029/95RG01302
- Ryuichi, S., 1999. Geochemistry of high Mg andesites and the tectonic evolution of the Okinawa Trough-Ryukyu arc system. *Chemical Geology*, 157(1—2): 69—88. doi: 10.1016/S0009-2541(98)00199-5
- Shimoda, G., Tatsumi, Y., Nohda, S., et al., 1998. Setouchi high-Mg[#] andesites revisited: geochemical evidence for melting of subducting sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 160(3—4): 479—492. doi: 10.1016/S0012-821X(98)00105-8
- Söderlund, U., Patchett, P. J., Vervoort, J. D., et al., 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3—4): 311—324. doi: 10.1016/S0012-821X(04)00012-3
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313—345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Tatsumi, Y., 2001. Geochemical modeling of partial melting of subducting sediments and subsequent melt-mantle interaction: generation of high-Mg andesites in the Setouchi volcanic belt, Southwest Japan. *Geology*, 29(4): 323—326. doi: 10.1130/0091-7613(2001)029<0323:GMOPMO>2.0.CO;2
- Wang, K. L., Chung, S. L., Chen, C. H., et al., 2002. Geochemical constraints on the petrogenesis of high-Mg basaltic andesites from the northern Taiwan volcanic zone. *Chemical Geology*, 182(2—4): 513—528. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00338-2
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhang, H. F., et al., 2006. Early Cretaceous gabbroic rocks from the Taihang Mountains: implications for a paleosubduction-related lithospheric mantle beneath the central North China craton. *Lithos*, 86(3—4): 281—302. doi: 10.1016/j.lithos.2005.07.001
- Wu, F. Y., Han, R. H., Yang, J. H., et al., 2007. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 238(3—4): 232—248. doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.11.012
- Wu, F. Y., Li, X. H., Zheng, Y. F., et al., 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1—2): 103—119. doi: 10.1016/j.tifl.2005.02.019
- Xu, P., Wu, F. Y., Xie, L. W., et al., 2004a. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1642—1648. doi: 10.1007/BF03184136
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Liu, X. C., et al., 2004b. Chronology and sources of Mesozoic intrusive complex in Xuzhou-Huainan region, Central China: constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 96—106. doi: 10.1111/j.1755-6724.2004.tb00679.x
- Xu, Y. G., Ma, J. L., Huang, X. L., et al., 2004c. Early Cretaceous gabbroic complex from Yinan, Shandong Province: petrogenesis and mantle domains beneath the North China craton. *International Journal of Earth Sciences*, 93(6): 1025—1041. doi: 10.1007/s00531-004-0430-7
- Xu, W. L., Chi, X. G., Yuan, C., et al., 1993. Mesozoic dioritic rocks and deep-seated inclusions in central North China platform. Geological Publishing Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, W. L., Hergt, J. M., Gao, S., et al., 2008. Interaction of adakitic melt-peridotite: implications for the high-Mg[#] signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 265(1—2): 123—137. doi: 10.1016/j.tifl.2007.09.041
- Xu, W. L., Yang, D. B., Gao, S., 2010a. Geochemistry of

- peridotite xenoliths in Early Cretaceous high-Mg[#] diorites from the central orogenic Block of the North China craton; the nature of Mesozoic lithospheric mantle and constraints on lithospheric thinning. *Chemical Geology*, 270(1–4): 257–273.
- Xu, W. L., Wang, C. G., Yang, D. B., et al., 2010b. Dunite xenoliths and olivine xenocrysts in gabbro from Taihang Mountains: characteristics of Mesozoic lithospheric mantle in central China. *Journal of Earth Sciences*, 21(5): 692–710. doi: 10.1007/s12583-010-0121-1
- Xu, W. L., Yang, C. H., Yang, D. B., et al., 2006. Mesozoic high-Mg diorites in eastern North China craton: constraints on the mechanism of lithospheric thinning. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 120–129 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Yang, D. B., Pei, F. P., et al., 2009. Petrogenesis of Fushan high-Mg[#] diorites from the southern Taihang Mts. in the central North China craton: resulting from interaction of peridotite-melt derived from partial melting of delaminated lower continental crust. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1947–1961 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-tectonic destruction of the archæan lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9–10): 747–757. doi: 10.1016/S1464-1895(01)00124-7
- Yang, C. H., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2005. Petrogenesis of Mesozoic high-Mg diorites in western Shandong: evidence from chronology and petro-geochemistry. *Journal of China University of Geosciences*, 16(4): 297–308.
- Yang, C. H., Xu, W. L., Yang, D. B., et al., 2008. Petrogenesis of Shangyu gabbro-diorites in western Shandong: geochronological and geochemical evidence. *Science in China (Ser. D)*, 51(4): 481–492. doi: 10.1007/s11430-008-0029-0
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, Northeast China: geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 89(1–2): 89–106. doi: 10.1016/j.lithos.2005.10.002
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353–370. doi: 10.1111/j.1751-908X.2004.tb00755.x
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China craton: evidence from major, trace element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241–254. doi: 10.1007/s00410-002-0395-0
- Zhao, G. C., Cawood, P., Lu, L. Z., 1999. Petrology and *P-T* history of the Wutai amphibolites: implications for tectonic evolution of the Wutai complex, China. *Precambrian Research*, 93(2–3): 181–199. doi: 10.1016/S0301-9268(98)00090-4
- Zhao, G. C., 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. *Precambrian Research*, 103(1–2): 55–88. doi: 10.1016/S0301-9268(00)00076-0
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China craton: lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1–2): 45–73. doi: 10.1016/S0301-9268(00)00154-6

附中文参考文献

- 陈斌, 田伟, 翟明国, 等, 2005. 太行山和华北其他地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义. 岩石学报, 21(1): 13–24.
- 陈智超, 陈斌, 田伟, 2007. 太行山北段中生代岩基及其包体锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义. 岩石学报, 23(2): 295–306.
- 高山, 金振民, 1997. 拆沉作用 (delamination) 及其壳—幔演化动力学意义. 地质科技情报, 16(1): 1–9.
- 李昌年, 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 裴福萍, 许文良, 王清海, 等, 2004. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学: 对岩石圈地幔性质的制约. 高校地质学报, 10(1): 88–97.
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等, 2004. 南太行山闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石成因研究. 岩石学报, 20(5): 1253–1262.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185–220.
- 许文良, 迟效国, 袁朝, 等, 1993. 华北地台中部中生代闪长质岩石及深源岩石包体. 北京: 地质出版社.
- 许文良, 杨承海, 杨德彬, 等, 2006. 华北克拉通东部中生代高 Mg 闪长岩——对岩石圈减薄机制的制约. 地学前缘, 13(2): 120–129.
- 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 等, 2009. 太行山南段符山高镁闪长岩的成因——拆沉陆壳物质熔融的熔体与地幔橄榄岩反应的结果. 岩石学报, 25(8): 1947–1961.