

# 恒山地区古元古代 2.1Ga 地壳重熔事件：钾质花岗岩锆石 U-Pb 定年及 Hf-Nd 同位素研究\*

赵瑞幅 郭敬辉 彭澎 刘富

ZHAO RuiFu, GUO JingHui, PENG Peng and LIU Fu

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, 北京 100029

State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2011-02-14 收稿, 2011-04-15 改回.

**Zhao RF, Guo JH, Peng P and Liu F. 2011. 2.1Ga crustal remelting event in Hengshan Complex: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf-Nd isotopic study on potassic granites. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6):1607-1623**

**Abstract** The Hengshan Complex in the Central Zone of the North China Craton, which is a typical high-grade terrain and experienced 1.85Ga high-pressure granulite facies metamorphism, composes of ~2.5Ga TTG gneisses and some paragneisses. A suite of potassic granites in this complex is investigated, which mainly consists of hornblende monzogranite and biotite monzogranite. Zircon grains from a hornblende monzogranite sample yield a weighted average  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age of  $2052 \pm 17\text{Ma}$  by LA-ICP-MS and  $2084 \pm 4\text{Ma}$  by SIMS. A biotite monzogranite sample gives a weighted average  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age of  $2060 \pm 18\text{Ma}$  by LA-ICP-MS and  $2083 \pm 15\text{Ma}$  by SIMS. Ca. 2080Ma SIMS ages possibly indicate the crystallization time of these potassic granites.  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of zircons in the granites range from -6.0 to 0.6 with  $t_{\text{DM}}$  (depleted mantle model ages) of 2.48 ~ 2.60Ga, while  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values range from -3.3 to -1.7 with  $t_{\text{DM}}$  of 2.43 ~ 2.68Ga. These indicate that the potassic granites were likely derived from ancient crust. Together with the geochemical characteristics of the surrounding TTG rocks, we suggest that the ~2.1Ga potassic granites could be originated from the partial melting of the 2.5Ga TTG gneisses. This study confirms a Paleoproterozoic (~2.1Ga) crust remelting event in Hengshan Complex, which may occur in an extensional setting in the North China Craton.

**Key words** Potassic granite; Crustal melting event; Paleoproterozoic; Hengshan Complex; North China Craton

**摘要** 恒山高级片麻岩地体位于华北克拉通中部构造带, 主体是形成于晚太古代~2.5Ga的TTG片麻岩和少量变质火山沉积岩, 并且经历了古元古代末~1.85Ga的高级变质作用。近年来, 在恒山片麻岩地体中识别出一套钾质花岗岩小侵入体群, 主要岩性是角闪石二长花岗岩和黑云母二长花岗岩。本文针对这套花岗岩, 采用LA-ICP-MS和Cameca 1280型离子探针进行锆石U-Pb定年, 获得角闪石二长花岗岩岩浆锆石谐和年龄 $2052 \pm 17\text{Ma}$ 和 $2084 \pm 4\text{Ma}$ , 黑云母二长花岗岩岩浆锆石谐和年龄 $2060 \pm 18\text{Ma}$ 和 $2083 \pm 15\text{Ma}$ 。它们在误差范围内一致, 代表花岗岩的形成时代。花岗岩锆石Hf同位素和全岩Nd同位素亏损地幔模式年龄分别为2.48~2.60Ga和2.43~2.68Ga, 与围岩TTG片麻岩模式年龄范围基本一致。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 主要分布范围分别为-6.0~0.6和-3.3~-1.7, 未显示同期幔源物质的添加。据此可以推断, 这些钾质花岗岩是恒山晚太古代TTG岩石在~2.1Ga部分熔融的产物。该期岩浆活动在华北克拉通已识别出多处, 恒山地区的这期岩浆活动显示了地壳重熔特征。结合五台、阜平等地对于同期事件的研究, 我们推测这些区域上~2.1Ga的岩浆活动形成于拉张裂解环境中。

**关键词** 钾质花岗岩; 地壳重熔; 古元古代; 恒山杂岩; 华北克拉通

中图法分类号 P588.121; P597.3

\* 本文受国家自然科学基金项目(40730315, 41023009)和岩石圈演化国家重点实验室项目联合资助。

第一作者简介: 赵瑞幅, 女, 1983年生, 博士研究生, 岩石学专业, E-mail: sunshine314@163.com

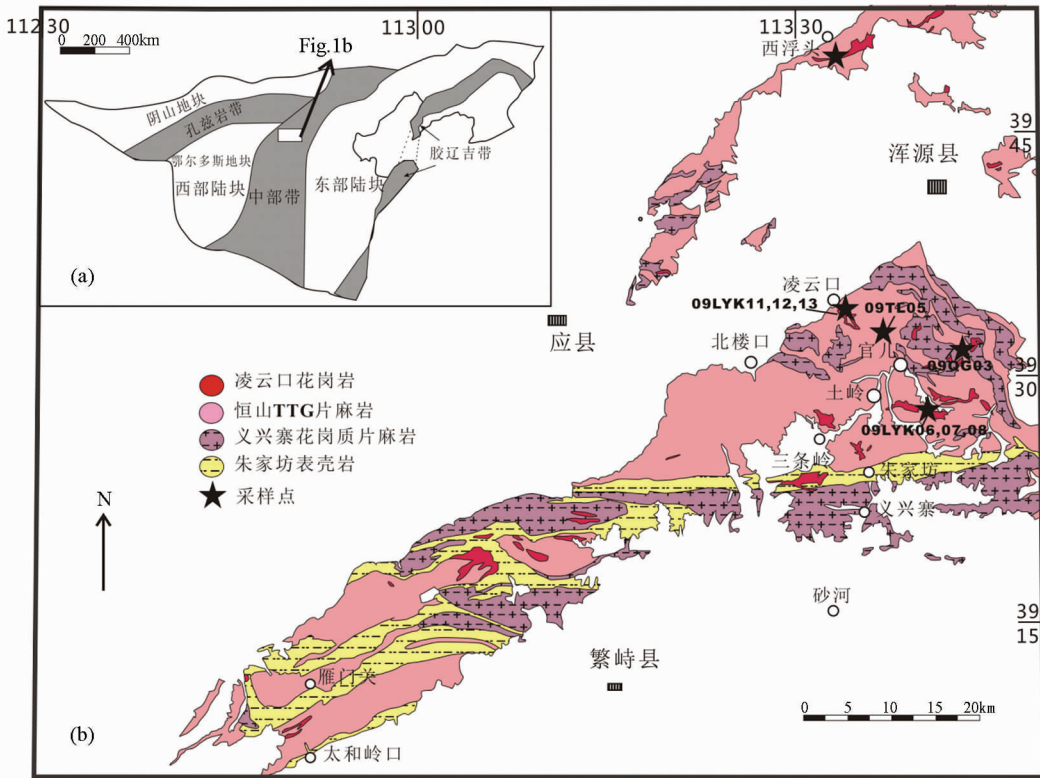


图1 华北克拉通划分模式图及研究区位置(a, 据 Zhao *et al.*, 2005 修改)和恒山地区地质简图及采样位置(b, 据山西省地质调查院, 2002 修改)

Fig. 1 Subdivisions of the North China Craton indicating the study area (a, after Zhao *et al.*, 2005) and simplified geological map of the Hengshan Complex and the sample locations (b)

## 1 引言

研究表明,华北克拉通大陆地壳的主体形成于晚太古代(沈其韩和钱祥麟, 1995; Zhai *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2005),并在古元古代末 1.95 ~ 1.85Ga 通过小陆块的碰撞拼合形成统一的克拉通(Zhao *et al.*, 1998, 2000, 2005)。然而,从太古宙末大规模岩浆活动结束(有些地段可能延续到 2.4Ga),直到古元古代末 1.95 ~ 1.85Ga 左右的碰撞拼合事件之前,有长达 4 亿多年的时间间隔。这期间的岩浆活动和构造热事件的记录比较少(Zhao *et al.*, 2006, 2007),除了中条山地区(Sun *et al.*, 1990; 孙大中等, 1991),这一期间华北克拉通其它地区所处的构造环境和经历的构造过程一直缺乏系统了解。

近年来,随着锆石 U-Pb 定年技术的广泛应用,华北克拉通古元古代岩浆活动得到了较多的识别,如辽东半岛的辽吉花岗岩(路孝平等, 2004; Lu *et al.*, 2006; Li and Zhao, 2007),五台地区王家会岩体中的粉色相(Wilde *et al.*, 2005),阜平地区的南营花岗岩片麻岩(Guan *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2005),怀安地区董家沟花岗岩片麻岩

(Zhao *et al.*, 2008),等等。在恒山地区,很可能也存在该时代的岩浆活动,Kröner *et al.* (2005b)报道了一个红色花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄  $2113 \pm 8\text{Ma}$ ; Wang *et al.* (2010)报道了一年龄为  $2193 \pm 15\text{Ma}$  的辉长岩。新的区调资料(山西省地质调查院, 2002<sup>①</sup>)在恒山片麻岩地区标出了一套钾质花岗岩,称为凌云口花岗岩,很可能形成于古元古代。本文选择恒山地区的这套钾质花岗岩为研究对象,在野外调查和岩石学研究的基础上,进行初步的锆石 U-Pb 定年和 Nd、Hf 同位素地球化学研究,据此探讨其成因和构造意义。

## 2 区域地质背景及样品特征

恒山高级片麻岩地体位于华北克拉通中部带的中段(图 1),主要包括出露在北部的混合岩化比较明显的恒山 TTG 片麻岩;分布于南部的混合岩化微弱的义兴寨片麻岩。朱家坊韧性剪切带以南还有较多的变质火山沉积岩,通常认为是五台群金刚组。另外,恒山西段有较多典型的高压基性麻

① 山西省地质调查院. 2002. 1:25 万应县幅区域地质调查报告

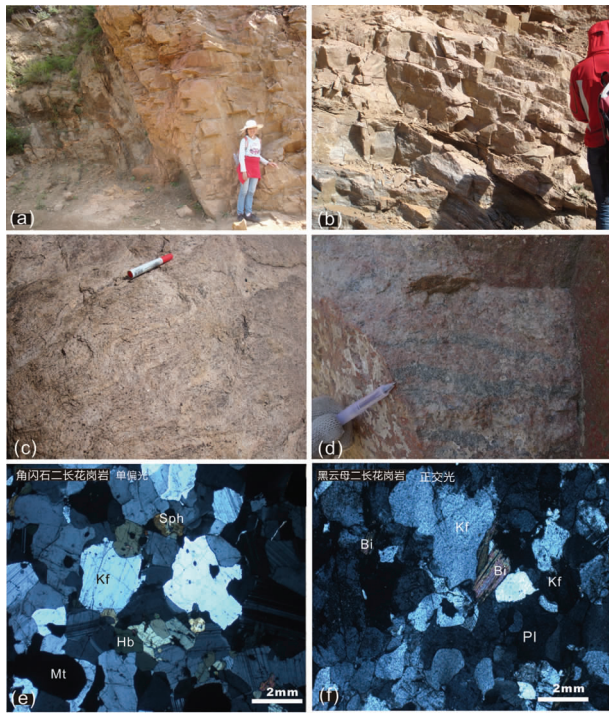


图2 恒山钾质花岗岩野外产状及显微镜下照片  
(a)-钾质花岗岩与围岩 TTG 为侵入接触关系;(b)-局部可见顺层侵入;(c)-角闪石二长花岗岩;(d)-黑云母二长花岗岩;(e)-(f)-2 类岩石样品的镜下显微照片. Bi-黑云母;Hb-角闪石;Kf-钾长石;Mt-磁铁矿;Pl-斜长石;Qtz-石英;Sph-榍石  
Fig. 2 Field relationship and microphotographs of the potassic granites from the Hengshan Complex

粒岩分布(王仁民等, 1991; Zhai *et al.*, 1996; Guo *et al.*, 2002; O'Brien *et al.*, 2005)。

在广泛的 TTG 片麻岩背景上,恒山地区还发育一套钾质花岗岩,被称为凌云口花岗岩(图 1)。这些花岗岩侵入体大多成群分布,略呈 NEE 向展布。野外观察表明,这些花岗岩呈小型侵入体、岩床、岩株、岩脉等形式产出,具有片麻状构造,有些较大岩体中心则呈弱片麻状至块状构造。有些岩体边界清楚,可以观察到与围岩片麻理的不协调;有些岩体边界不清,与片麻岩围岩呈渐变过渡关系。

薄片观察显示,花岗岩主要有 2 种岩性:角闪石二长花岗岩和黑云母二长花岗岩(图 2)。本文选择 6 件花岗岩样品及 2 件围岩 TTG 片麻岩样品用于锆石 U-Pb 定年和 Hf-Nd 同位素地球化学研究:(1)样品 09LYK06、09LYK07、09LYK08 采自浑源东沙沟,角闪石二长花岗岩,中细粒块状到弱片麻状构造;(2)黑云母二长花岗岩样品 09LYK11、09LYK13 采自浑源凌云口,呈粗粒弱片麻状构造;样品 09XF03 采自浑源西浮头,中-粗粒弱片麻状构造;(3)片麻岩围岩的代表样品 09QG03 和 09TL05 分别采自浑源官儿乡桥沟村和大湾村,均为英云闪长质片麻岩。

角闪石二长花岗岩的矿物组合为:钾长石 + 斜长石 + 石

英 + 角闪石 + 磁铁矿 ± 榍石;黑云母二长花岗岩的矿物组合为:钾长石 + 斜长石 + 石英 + 黑云母(图 2)。主元素组成显示,花岗岩的  $\text{SiO}_2$  含量范围为 70.98% ~ 74.65%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 12.61% ~ 13.56%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 5.00% ~ 7.55%,  $\text{Na}_2\text{O}$  为 2.63% ~ 3.85%,  $\text{CaO}$  含量较低,均小于 1.50,  $A/CNK$  为 0.87 ~ 1.14,大部分集中在 0.87 ~ 1.00 之间,为准铝质到弱过铝质。微量元素组成显示:黑云母二长花岗岩亏损 HREE, Eu 无异常或弱负异常;而角闪石二长花岗岩则具有低  $\text{CaO}$  含量,较高的  $\text{FeO}^T/\text{MgO}$  和  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值,较高的稀土总量和  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$  比值及明显的 Eu 负异常, Sr, Ba 亏损等,表现为 A 型花岗岩的特征。详细的地球化学研究将另文发表。

### 3 分析方法

#### 3.1 锆石 U-Pb 同位素分析

在双目镜下将锆石样品用双面胶粘在载玻片上,放上 PVC 环,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 环中,注意去除气泡。待树脂充分固化后,将样品从载玻片上取下,并对锆石靶进行抛光,抛光程度大约为保留锆石的  $1/2 \sim 2/3$ 。样品测定之前用体积百分比为 3% 的  $\text{HNO}_3$  清洗样品表面,以除去样品表面的污染。锆石阴极发光图像 (CL) 在西北大学大陆动力学国家重点实验室用装有 MonoCL 3 + 阴极发光系统的扫描电镜拍摄。本文选取两件英云闪长岩样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定,两件花岗岩样品则应用 LA-ICP-MS 和离子探针 Cameca IMS-1280 两种方法进行了锆石 U-Pb 定年分析。

4 件样品的锆石 U-Pb 同位素在西北大学大陆动力学国家重点实验室使用带有 GeoLas200M 激光剥蚀系统的 Agilent 7500a ICP-MS 仪器上测定。哈佛大学的标准锆石 91500 作为计算同位素年龄的外标,其参考值加权平均  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $1065.4 \pm 0.6\text{Ma}$  (Wiedenbeck *et al.*, 1995)。元素含量的计算采用硅酸盐玻璃 NISTSRM610 为外标,  $^{29}\text{Si}$  为内标。激光剥蚀斑直径为  $20\mu\text{m}$ 。原始数据使用 GLITTER 4.0 软件 (Macquarie University) 进行处理,处理后的数据使用 ComPb CorrJHJ3\_151 软件 (Andersen, 2002) 进行普通铅校正。锆石的 U-Pb 年龄结果使用 Isoplot 程序 (Ludwig, 2003) 计算。详细的仪器参数设置及分析技术见柳小明等 (2007)。

2 件花岗岩样品的锆石 U-Pb 定年在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室的多接收 Cameca 1280 二次离子质谱仪完成。详细的分析方法见 Li *et al.* (2009)。锆石标样与锆石样品以 1 : 3 比例交替测定。U-Th-Pb 同位素比值用标准锆石 Plésovice (337Ma, Slama *et al.*, 2007) 校正获得, U 含量采用标准锆石 91500 ( $81 \times 10^{-6}$ , Wiedenbeck *et al.*, 1995) 校正获得,以长期监测标准样品获得的标准偏差 ( $1\text{SD} = 1.5\%$ , Li *et al.*, 2010) 和单点测试内部精度共同传递得到样品单点误差,以标准样品 Qinghu (159.5Ma, Li *et*

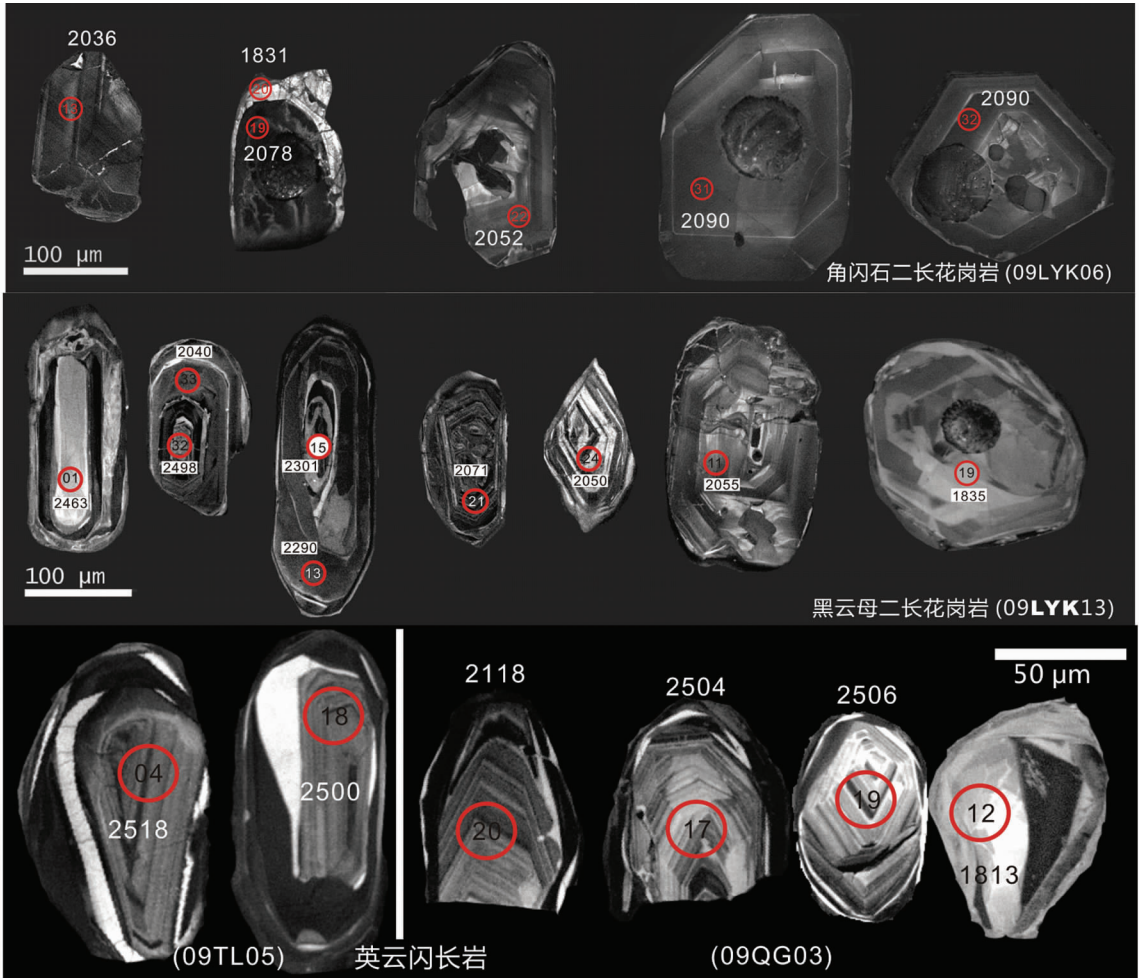


图3 恒山地区钾质花岗岩及其围岩 TTG 片麻岩锆石 CL 图像

Fig.3 CL images of zircons for the potassic granites and the TTG gneisses in Hengshan Complex

al., 2009) 作为未知样监测数据的精确度。普通 Pb 校正采用实测  $^{204}\text{Pb}$  值。由于测得的普通 Pb 含量非常低, 假定普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染, 以现代地壳的平均 Pb 同位素组成 (Kramers and Tuller, 1995) 作为普通 Pb 组成进行校正。同位素比值及年龄误差均为  $1\sigma$ 。数据处理采用 Isoplot 软件 (Ludwig, 2003)。

### 3.2 锆石 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素原位分析在中国科学院地质与地球物理研究所多通道等离子质谱实验室配有 193nm 激光剥蚀系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (LA-MC-ICPMS) 上完成。激光斑束直径为  $60\mu\text{m}$ , 所用的激光脉冲频率为 8Hz, 每个分析点的气体背景采集时间为 30s, 信号采集时间为 30s。测定时用国际标样 91500 作外标, 每测定 5 个样品点, 测定一个锆石 91500。采用静态测定模式, 不使用 Neptune 的虚拟放大器功能。干扰校正取推荐值  $^{175}\text{Lu}/^{176}\text{Lu} = 0.02655$ ,  $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5887$ ,  $\beta_{\text{Yb}}$  值根据平均  $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$  比值计算 (Iizuka and Hirata, 2005), 用  $\beta_{\text{Yb}}$  平均值来校正

$^{176}\text{Yb}$  对  $^{176}\text{Hf}$  的影响。仪器的运行条件和分析流程可参阅 Wu *et al.*, (2006)。

### 3.3 Sm-Nd 同位素分析

全岩 Sm-Nd 同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素实验室完成。用 Teflon 溶样罐称取约 100mg 的全岩粉末样品, 加入适量的和  $^{149}\text{Sm}-^{150}\text{Nd}$  混合稀释剂, 再加入纯化的 HF + HNO<sub>3</sub> 混合酸溶解; 利用 AG50 × 12 交换树脂分离稀土元素, 然后采用 P507 萃淋树脂分离出纯净的 Sm 和 Nd。在 MAT-262 质谱计上完成测试, Nd 同位素校正采用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 。详细的实验流程见文献 (Wasserburg *et al.*, 1981)。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年代学

#### 4.1.1 钾质花岗岩定年结果

角闪石二长花岗岩样品 09LYK06 的 CL 图像显示 (图

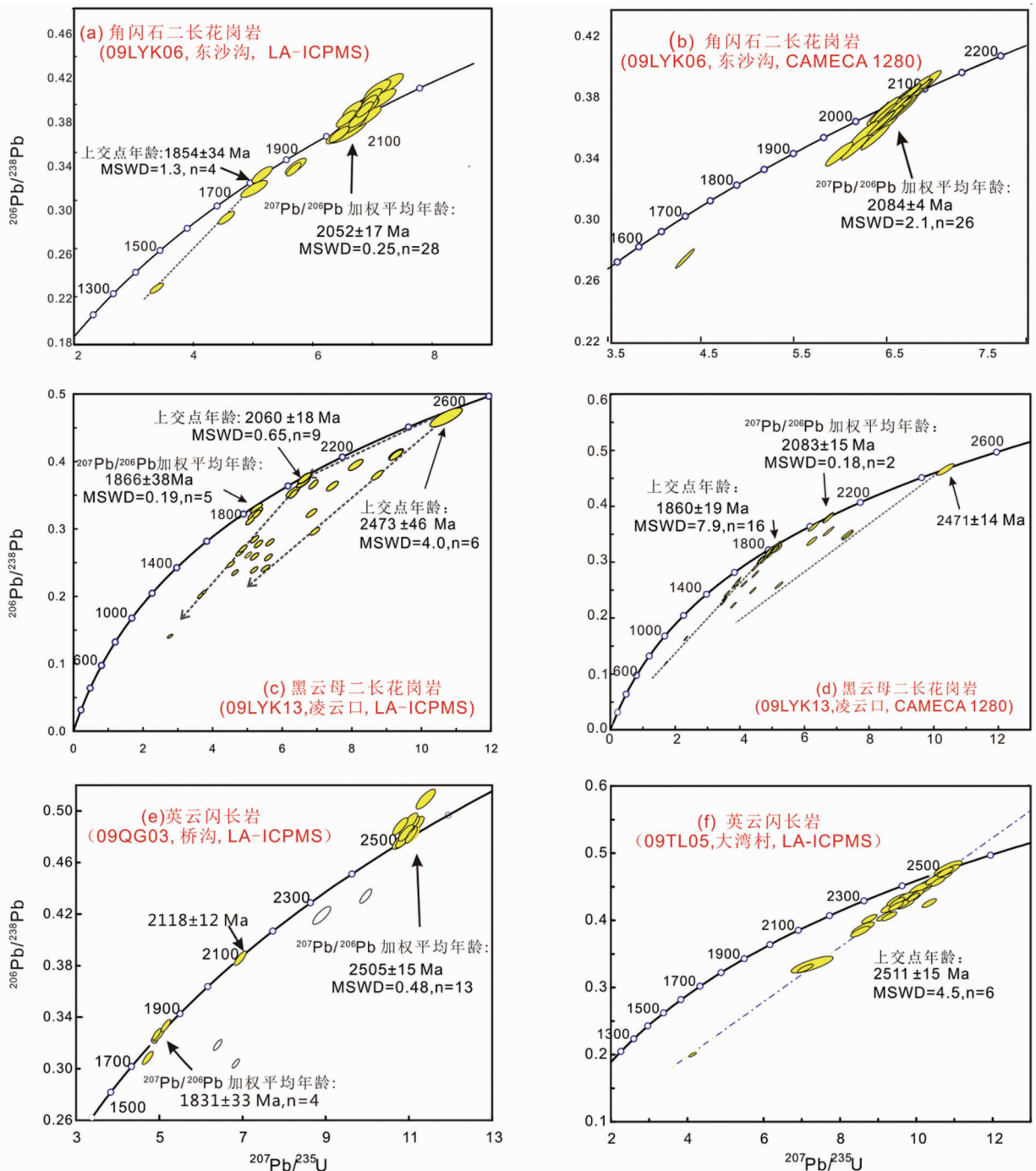


图4 恒山钾质花岗岩及TTG片麻岩锆石U-Pb年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagram showing zircon U-Pb data for the potassic granites and TTG gneisses in the Hengshan Complex

3), 锆石多为短柱状, 长宽比  $1:1 \sim 2:1$ , 半自形到自形, 粒度多在  $100 \sim 200 \mu\text{m}$ , 个别可达  $300 \mu\text{m}$ 。大部分锆石内部发育较宽的环带, 显示岩浆成因特点。部分锆石具有核-边结构, 核部具有震荡环带, 显示岩浆锆石特征, 边部 CL 图像亮度较高, 是变质锆石 (图 3)。

应用 LA-ICP-MC 测试方法, 选取 30 颗锆石进行了 34 个点的分析 (表 1)。锆石 U 和 Th 的含量分别为  $30 \times 10^{-6} \sim$

$730 \times 10^{-6}$  和  $19 \times 10^{-6} \sim 684 \times 10^{-6}$ , 岩浆锆石的 Th/U 比值在  $0.25 \sim 1.32$ , 变质边的 Th/U 比值在  $0.08 \sim 0.34$ 。岩浆锆石共 30 个数据点, 均落在谐和线附近 (图 4a), 除 24, 25 两个点之外, 其余 28 个点的分布都很集中,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值为  $2052 \pm 17$  Ma, 方差 MSWD=0.25。另外有 4 个数据点采集自岩浆锆石外的变质边, 其中 3 个点有不同程度的铅丢失, 这 4 个数据点构成的不一致线与谐和线的上交点年龄



续表 1

Continued Table 1

样品 点号	含量 ( $\times 10^{-6}$ )				同位素比值						年龄 (Ma)						谐和 度		
	Pb	Th	U	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$1\sigma$		$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$1\sigma$
32	30	29	59	0.49	6.797	0.1893	0.381	0.0067	0.1244	0.0033	2090	57	2085	25	2081	31	2369	60	100
33	90	124	173	0.71	6.4899	0.1079	0.3796	0.0048	0.1063	0.0015	2014	41	2045	15	2074	23	2042	27	97
34	16	19	30	0.64	6.7066	0.2188	0.3835	0.0076	0.1058	0.0031	2054	64	2074	29	2093	35	2032	56	98
黑云母-二长花岗岩 09LYK13																			
1	106	135	768	0.18	4.8707	0.0638	0.2199	0.0026	0.0751	0.0010	2462	36	1797	11	1282	14	1464	19	192
2	59	71	445	0.16	5.1471	0.0740	0.2900	0.0035	0.0946	0.0015	2081	38	1844	12	1641	17	1826	27	127
3	111	156	812	0.19	3.5836	0.0474	0.2056	0.0024	0.0768	0.0010	2049	37	1546	10	1205	13	1495	18	170
4	184	288	495	0.58	5.2561	0.0783	0.2829	0.0035	0.0908	0.0011	2161	39	1862	13	1606	17	1757	20	135
5	140	220	658	0.33	2.7015	0.0433	0.1452	0.0018	0.1017	0.0013	2164	40	1329	12	874	10	1958	23	248
6	233	325	1154	0.28	4.9594	0.0648	0.2662	0.0031	0.1058	0.0012	2165	37	1812	11	1522	16	2033	22	142
7	141	208	401	0.52	6.7825	0.1011	0.3286	0.0041	0.0981	0.0012	2342	38	2083	13	1832	20	1891	23	128
8	106	154	439	0.35	5.1432	0.0788	0.2641	0.0033	0.0866	0.0012	2242	39	1843	13	1511	17	1678	22	148
9	228	342	758	0.45	5.5893	0.0775	0.2852	0.0034	0.0926	0.0011	2254	37	1915	12	1617	17	1790	20	139
10	97	130	522	0.25	5.5410	0.0732	0.2629	0.0031	0.0922	0.0011	2378	36	1907	11	1505	16	1782	21	158
11	115	185	150	1.24	6.5561	0.1286	0.3748	0.0053	0.1060	0.0014	2055	45	2054	17	2052	25	2036	25	100
12	78	77	796	0.10	5.1525	0.0033	0.1452	0.0033	0.1098	0.0017	2374	36	1841	12	1408	15	2106	32	169
13	24	23	213	0.11	7.3917	0.1130	0.3692	0.0047	0.0861	0.0011	2290	38	2160	14	2026	22	1670	20	113
14	270	433	941	0.46	4.5801	0.0581	0.2402	0.0028	0.0756	0.0008	2206	36	1746	11	1388	15	1473	15	159
15	136	211	226	0.93	8.0665	0.1337	0.4005	0.0053	0.0958	0.0012	2300	40	2239	15	2171	24	1848	22	106
16	293	415	762	0.54	8.6820	0.1085	0.3852	0.0045	0.1149	0.0012	2492	35	2305	11	2100	21	2199	22	119
17	270	437	312	1.40	9.1489	0.1379	0.4175	0.0053	0.1121	0.0013	2444	38	2353	14	2249	24	2148	24	109
18	74	84	341	0.25	9.1488	0.1259	0.4167	0.0051	0.1159	0.0016	2448	36	2353	13	2245	23	2217	29	109
19	10	7	132	0.05	5.1987	0.1066	0.3361	0.0047	0.0701	0.0038	1835	48	1852	17	1868	23	1370	72	98
20	98	114	2398	0.05	1.3837	0.0184	0.1095	0.0013	0.2024	0.0025	1460	40	882	8	670	7	3726	41	218
21	224	358	681	0.53	4.4572	0.0642	0.2525	0.0031	0.0674	0.0008	2071	38	1723	12	1452	16	1319	15	143
22	18	12	259	0.05	5.0170	0.0788	0.3177	0.0040	0.1305	0.0034	1872	41	1822	13	1779	19	2479	60	105
23	9	4	151	0.03	5.2325	0.0969	0.3302	0.0044	0.1159	0.0055	1879	45	1858	16	1840	22	2216	100	102
24	89	105	1007	0.10	3.6657	0.0489	0.2102	0.0025	0.0864	0.0012	2050	37	1564	11	1230	13	1674	22	167
25	117	178	355	0.50	4.8094	0.0750	0.2759	0.0035	0.1177	0.0014	2049	40	1787	13	1571	18	2250	26	130
26	41	46	380	0.12	4.7202	0.0746	0.2703	0.0034	0.0953	0.0018	2052	40	1771	13	1543	17	1839	33	133
27	75	104	402	0.26	5.0956	0.0868	0.3262	0.0042	0.1160	0.0022	1853	43	1835	14	1820	21	2218	39	102
28	179	257	772	0.33	5.4666	0.0802	0.2467	0.0031	0.0890	0.0012	2463	37	1895	13	1422	16	1724	22	173

续表 1

Continued Table 1

样品 点号	含量 ( $\times 10^{-6}$ )				Th/U				同位素比值				年龄 (Ma)				谐和 度					
	Pb	Th	U	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$1\sigma$						
	29	111	148	1232	0.12	0.1037	0.0022	2.3576	0.0323	0.1649	0.0020	0.1388	0.0017	1691	39	1230		10	984	11	2627	30
30	177	223	813	0.27	0.1656	0.0034	6.8855	0.0874	0.3016	0.0036	0.1463	0.0016	2513	35	2097	11	1699	18	2759	29	148	
31	19	12	298	0.04	0.1151	0.0027	5.1937	0.0826	0.3272	0.0041	0.1558	0.0042	1882	41	1852	14	1825	20	2926	74	103	
32	44	58	127	0.46	0.1641	0.0054	10.6706	0.3033	0.4717	0.0092	0.1332	0.0033	2498	55	2495	26	2491	40	2527	58	100	
33	29	27	305	0.09	0.1258	0.0033	6.2556	0.1279	0.3606	0.0052	0.1386	0.0043	2040	46	2012	18	1985	25	2624	77	103	
34	306	391	1503	0.26	0.1337	0.0027	6.8491	0.0838	0.3716	0.0043	0.1021	0.0011	2147	35	2092	11	2037	20	1965	20	105	
35	173	185	1336	0.14	0.1271	0.0026	6.2668	0.0778	0.3575	0.0042	0.1122	0.0013	2059	36	2014	11	1970	20	2149	24	105	
英云闪长岩 09QG03																						
1	50	30	78	0.39	0.1631	0.0028	11.0189	0.1455	0.4899	0.0049	0.1268	0.0020	2488	28	2524	12	2570	21	2413	36	97	
2	291	37	800	0.05	0.1644	0.0022	6.8798	0.0560	0.3036	0.0023	0.1222	0.0015	2501	22	2096	7	1709	12	2330	27	146	
3	79	67	121	0.55	0.1658	0.0031	11.1251	0.1681	0.4868	0.0054	0.1280	0.0021	2515	31	2534	14	2557	23	2434	37	98	
4	50	45	76	0.59	0.1642	0.0030	11.0292	0.1604	0.4873	0.0052	0.1330	0.0020	2499	30	2526	14	2559	23	2523	35	98	
5	117	40	184	0.22	0.1622	0.0028	11.5184	0.1519	0.5149	0.0052	0.1193	0.0026	2479	28	2566	12	2678	22	2278	46	93	
6	84	64	131	0.49	0.1652	0.0027	10.9539	0.1346	0.4808	0.0046	0.1247	0.0017	2510	27	2519	11	2531	20	2374	30	99	
7	568	17	2294	0.01	0.1072	0.0015	3.2074	0.0268	0.2171	0.0017	0.2141	0.0042	1752	24	1459	6	1266	9	3922	69	138	
8	89	67	138	0.48	0.1671	0.0025	11.1516	0.1149	0.4840	0.0042	0.1218	0.0013	2529	25	2536	10	2545	18	2324	24	99	
9	147	89	263	0.34	0.1673	0.0024	9.9914	0.0959	0.4332	0.0036	0.1036	0.0012	2530	24	2434	9	2320	16	1992	21	109	
10	45	36	70	0.51	0.1657	0.0027	10.8996	0.1307	0.4771	0.0045	0.1337	0.0017	2514	27	2515	11	2515	20	2536	31	100	
11	45	42	79	0.53	0.1549	0.0030	8.9346	0.1385	0.4183	0.0046	0.1201	0.0020	2401	32	2331	14	2253	21	2293	35	107	
12	74	4	197	0.02	0.1109	0.0019	4.9830	0.0661	0.3260	0.0030	0.1028	0.0051	1813	31	1816	11	1819	15	1978	94	100	
13	146	139	345	0.40	0.1470	0.0022	6.4448	0.0652	0.3179	0.0027	0.1065	0.0011	2312	25	2038	9	1780	13	2045	20	130	
14	54	38	85	0.44	0.1654	0.0031	10.8848	0.1695	0.4774	0.0054	0.1392	0.0026	2511	32	2513	14	2516	23	2635	46	100	
15	27	1	75	0.01	0.1123	0.0024	4.7699	0.0874	0.3080	0.0034	0.2281	0.0203	1837	39	1780	15	1731	17	4153	334	106	
16	211	40	443	0.09	0.1746	0.0024	0.3800	0.0030	9.1460	0.0809	0.1385	0.0020	2602	23	2076	14	2353	8	2622	29	111	
17	66	51	102	0.50	0.1648	0.0027	10.8169	0.1298	0.4761	0.0045	0.1320	0.0017	2505	27	2508	11	2510	20	2506	31	100	
18	81	41	127	0.33	0.1611	0.0025	10.8183	0.1210	0.4871	0.0044	0.1489	0.0021	2467	26	2508	10	2558	19	2805	36	96	
19	65	50	98	0.51	0.1649	0.0025	10.9562	0.1167	0.4820	0.0042	0.1435	0.0016	2506	25	2519	10	2536	18	2710	29	99	
20	44	35	88	0.40	0.1315	0.0023	6.9869	0.0943	0.3853	0.0037	0.1109	0.0017	2118	30	2110	12	2101	17	2126	31	101	
21	23	2	61	0.03	0.1121	0.0023	5.0382	0.0851	0.3261	0.0034	0.1194	0.0072	1833	36	1826	14	1819	17	2280	131	101	
22	63	2	161	0.01	0.1134	0.0020	5.2036	0.0732	0.3330	0.0032	0.1120	0.0094	1854	32	1853	12	1853	15	2145	171	100	
英云闪长岩 09TL05																						
1	73	59	105	0.56	0.1660	0.0034	10.8949	0.1619	0.4761	0.0054	0.1289	0.0020	2517	34	2514	14	2510	24	2451	35	100	



续表 1

Continued Table 1

样品 点号	含量( $\times 10^{-6}$ )			同位素比值				年龄 (Ma)				谐和 度						
	Pb	Th	U	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{232}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$					
														1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$
2	94	119	146	0.81	9.5118	0.1817	0.4317	0.0058	0.0938	0.0017	2454	2389	18	2313	26	1812	32	106
3	121	84	197	0.42	9.8804	0.1614	0.4371	0.0053	0.1093	0.0021	2497	2424	15	2338	24	2096	39	107
4	78	84	121	0.70	9.7273	0.1402	0.4249	0.0047	0.1183	0.0016	2518	2409	13	2283	21	2259	29	110
5	39	44	67	0.65	8.6023	0.1944	0.3892	0.0059	0.1099	0.0024	2459	2297	21	2119	27	2107	44	116
6	68	42	121	0.34	8.9784	0.1191	0.4048	0.0042	0.1232	0.0019	2465	2336	12	2191	19	2348	34	112
7	99	141	148	0.96	9.6983	0.1352	0.4359	0.0047	0.1092	0.0013	2470	2407	13	2332	21	2094	24	106
8	186	313	648	0.48	4.2688	0.0559	0.2026	0.0021	0.0615	0.0008	2378	1687	11	1189	11	1206	15	200
9	107	78	176	0.45	9.9876	0.1330	0.4394	0.0047	0.1121	0.0017	2506	2434	12	2348	21	2147	30	107
10	78	48	135	0.35	9.3607	0.1879	0.4210	0.0058	0.1214	0.0031	2469	2374	18	2265	26	2316	56	109
11	90	146	189	0.78	7.0928	0.1352	0.3297	0.0043	0.0751	0.0014	2413	2123	17	1837	21	1463	25	131
12	60	62	103	0.60	9.1651	0.1348	0.4070	0.0046	0.1131	0.0016	2490	2355	13	2201	21	2166	30	113
13	110	137	171	0.80	10.3377	0.1258	0.4269	0.0043	0.1188	0.0013	2612	2466	11	2292	20	2269	23	114
14	92	111	148	0.75	9.6286	0.1358	0.4251	0.0047	0.1091	0.0014	2500	2400	13	2284	21	2094	26	109
15	33	39	51	0.78	10.0869	0.2191	0.4460	0.0066	0.1246	0.0025	2498	2443	20	2378	30	2373	45	105
16	97	121	156	0.78	9.4954	0.1253	0.4281	0.0045	0.1056	0.0013	2465	2387	12	2297	20	2029	23	107
17	46	70	91	0.77	7.6744	0.2836	0.3386	0.0077	0.1027	0.0034	2501	2194	33	1880	37	1975	62	133
18	76	76	115	0.66	10.4579	0.1447	0.4618	0.0050	0.1314	0.0017	2500	2476	13	2447	22	2495	31	102
19	78	65	120	0.54	10.6205	0.1449	0.4694	0.0051	0.1215	0.0017	2498	2491	13	2481	22	2318	31	101
20	134	120	201	0.60	10.7624	0.1412	0.4732	0.0050	0.1302	0.0017	2507	2503	12	2497	22	2474	30	100
21	138	83	226	0.37	10.5669	0.1211	0.4590	0.0045	0.1215	0.0015	2528	2486	11	2435	20	2318	27	104
22	65	49	111	0.44	9.8548	0.1911	0.4349	0.0059	0.1307	0.0029	2501	2421	18	2328	27	2482	51	107
23	156	28	288	0.10	9.9870	0.1132	0.4362	0.0043	0.1338	0.0025	2518	2434	10	2333	19	2538	45	108
24	102	93	185	0.50	9.2967	0.1301	0.4074	0.0044	0.1087	0.0016	2513	2368	13	2203	20	2086	29	114
25	40	57	72	0.80	8.5325	0.1643	0.3842	0.0051	0.1058	0.0018	2467	2289	18	2096	24	2033	33	118
26	58	51	90	0.57	10.6893	0.1691	0.4665	0.0055	0.1293	0.0021	2520	2497	15	2468	24	2458	37	102
27	117	31	226	0.14	9.4669	0.1205	0.4220	0.0044	0.1199	0.0025	2484	2384	12	2269	20	2288	45	109
28	41	45	65	0.69	10.2600	0.1972	0.4542	0.0062	0.1317	0.0024	2495	2459	18	2414	27	2501	43	103
29	45	46	72	0.63	10.0847	0.1754	0.4493	0.0056	0.1282	0.0022	2485	2443	16	2392	25	2439	39	104
30	39	46	64	0.72	9.7598	0.2434	0.4324	0.0071	0.1228	0.0029	2494	2412	23	2317	32	2342	52	108
31	77	11	135	0.08	10.7673	0.1674	0.4721	0.0055	0.1404	0.0050	2512	2503	14	2493	24	2656	88	101
32	32	16	53	0.29	10.8313	0.2403	0.4789	0.0073	0.1348	0.0043	2498	2509	21	2522	32	2555	76	99



续表 2

Continued Table 2

样品 点号	含量 ( $\times 10^{-6}$ )		Th/U	$f_{206} \%$	同位素比值						年龄 (Ma)						
	U	Th			$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$ (%)	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$ (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$ %	$\rho$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$1\sigma$
24	224	11	0.049	0.06	0.11416	0.67	5.17921	1.64	0.3290	1.50	0.914	1867	12	1849	14	1834	24
25	499	183	0.367	0.07	0.15340	0.38	7.35222	1.55	0.3476	1.50	0.969	2384	7	2155	14	1923	25
26	1261	536	0.425	0.15	0.10285	0.58	2.32865	1.61	0.1642	1.50	0.933	1676	11	1221	12	980	14
27	283	70	0.249	0.25	0.11138	0.65	4.93691	1.66	0.3215	1.53	0.920	1822	12	1809	14	1797	24
28	434	58	0.134	0.53	0.14604	0.52	5.21714	1.61	0.2591	1.52	0.945	2300	9	1855	14	1485	20
29	245	221	0.904	0.46	0.11082	0.76	4.65279	1.68	0.3045	1.50	0.893	1813	14	1759	14	1714	23
30	306	125	0.408	0.22	0.11102	0.79	4.68087	1.70	0.3058	1.50	0.884	1816	14	1764	14	1720	23
31	213	200	0.935	0.07	0.12525	0.69	6.28002	1.66	0.3637	1.51	0.910	2032	12	2016	15	1999	26
32	1587	120	0.076	1.21	0.10716	0.55	3.60566	1.60	0.2440	1.50	0.940	1752	10	1551	13	1408	19

为  $1854 \pm 34\text{Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 1.3$ , 代表角闪石二长花岗岩经历高级变质作用的时间。

为了检验该花岗岩的形成时代的可靠性, 本文还同时采用了 Cameca 1280 型离子探针集中分析了同一个角闪石二长花岗岩样品的岩浆锆石(表 2)。29 个分析点中的 26 个点落在谐和线附近, 获得  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄  $2084 \pm 4\text{Ma}$ , 这一年龄结果与 LA-ICP-MS 所测结果相当, 更好地反映了角闪石二长花岗岩的形成时代。

黑云母二长花岗岩样品 09LYK13 中锆石多为浅黄色短柱状(图 3), 长宽比  $1:1 \sim 3:1$ , 粒度多在  $100 \sim 300\mu\text{m}$ 。锆石内部结构复杂。一些锆石内部可见震荡环带, 是典型的岩浆锆石。还发现有继承锆石, 是岩浆锆石中的残留核。另有部分锆石呈等轴粒状, 内部具有杉叶状扇区结构, 是典型的麻粒岩相变质锆石(图 3)。对该样品中的 26 颗锆石进行了 35 个点分析。谐和图中可以看出(图 4c), 6 颗继承锆石分析点大致构成了一条不一致线, 其中一个点落在谐和线上, 不一致线上交点年龄为  $2473 \pm 46\text{Ma}$ , 应代表源岩的形成时代。9 个岩浆锆石分析点构成不一致线, 其中有 3 个点落在谐和线附近, 不一致线上交点年龄为  $2060 \pm 18\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 0.65$ ), 代表该花岗岩结晶年龄。15 个点偏离谐和线, 落在上述两条不一致线和谐和线构成的三角面内, 显示不同程度的铅丢失。另有 5 个变质锆石分析点落在谐和线附近, 具有一致的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 加权平均年龄为  $1866 \pm 38\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 0.19$ ), 代表了花岗岩经历高级变质作用的时间。

采用 Cameca 1280 型离子探针测试, 获得的数据结果在谐和图上的分布规律与 LA-ICPMS 分析结果相同。有两个岩浆锆石分析点叠落在谐和线上,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $2083 \pm 15\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 0.18$ )。还有一颗继承锆石获得了  $2471\text{Ma}$  的谐和年龄。另外, 变质作用时代得到了更为精确可靠的测定, 15 个点的上交点年龄为  $1860 \pm 19\text{Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 7.9$ , 与恒山典型高压基性麻粒岩记录的变质时代相当 (Kröner *et al.*, 2005a)。

#### 4.1.2 围岩 TTG 片麻岩定年结果

本文选择 2 件围岩 TTG 片麻岩样品 09QG03 和 09TL05 进行锆石 U-Pb 定年。样品中的锆石多为岩浆锆石, 保留了较好的韵律环带, 部分发育亮的变质增生边(图 3)。采用 LA-ICP-MS 对这 2 件锆石样品进行分析, 分别获得了  $2505 \pm 15\text{Ma}$  的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄(图 4e) 和  $2511 \pm 15\text{Ma}$  的不一致线上交点年龄(图 4f)。这两个年龄在误差范围内非常一致, 与已有的高精度锆石 U-Pb 年龄结果相当 (Kröner *et al.*, 2005a), 代表了恒山 TTG 片麻岩的形成时代。样品 09QG03 中还有一个岩浆锆石的谐和线年龄为  $2118 \pm 12\text{Ma}$ , 可能反映了与钾质花岗岩同期的地壳熔体的影响。另有 4 个变质锆石分析点落在谐和线附近, 具有一致的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 加权平均年龄为  $1831 \pm 33\text{Ma}$ , 代表了 TTG 片麻岩经历麻粒岩相变质作用的时间。

#### 4.2 锆石 Hf 同位素特征

对角闪石二长花岗岩(09LYK06)、黑云母二长花岗岩(09LYK13)和 TTG 片麻岩(09QG03、09TL05)共 4 个样品进行了锆石 Lu-Hf 同位素分析(表 3)。

大部分颗粒锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值小于 0.002, 显示锆石在形成以后具有较低的放射性成因 Hf 的积累。钾质花岗岩样品的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值都集中分布于  $0.281310 \sim 0.281500$ , Hf 同位素单阶段亏损地幔模式年龄集中分布于  $2480 \sim 2600\text{Ma}$ , 均值为  $2543\text{Ma}$ , 表明钾质花岗岩的源岩形成于晚太古代。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  变化范围在  $-6.6 \sim 0.6$  之间, 平均值为  $-2.9$ , 远远小于同时代亏损地幔  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值。围岩 TTG 片麻岩的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值集中于  $0.281243 \sim 0.281464$ , Hf 同位素单阶段亏损地幔模式年龄主要分布范围为  $2500 \sim 2690\text{Ma}$ , 均值为  $2608\text{Ma}$ 。TTG 片麻岩的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  均为正值, 平均值为 5.3, 与 2.5Ga 亏损地幔的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值相近。

#### 4.3 Sm-Nd 同位素特征

选取角闪石二长花岗岩、黑云母二长花岗岩样品各 3 件

表3 恒山地区钾质花岗岩及TTG片麻岩锆石Lu-Hf同位素分析结果

Table 3 Lu-Hf isotopic compositions of zircons for the potassic granites and the TTG gneisses in Hengshan Complex

样品 点号	$t_{\text{Ma}}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
角闪石二长花岗岩 09LYK06										
1	2080	0.036807	0.001251	0.281481	0.000014	-45.7	-1.7	2498	2761	-0.96
2	2080	0.044248	0.001513	0.281557	0.000030	-43.0	0.6	2409	2616	-0.95
3	2080	0.025380	0.000884	0.281476	0.000020	-45.9	-1.4	2481	2741	-0.97
4	2080	0.027351	0.001032	0.281483	0.000022	-45.7	-1.3	2480	2737	-0.97
5	2080	0.037873	0.001266	0.281503	0.000021	-44.9	-0.9	2467	2712	-0.96
6	2080	0.062948	0.002113	0.281478	0.000025	-45.8	-3.0	2559	2839	-0.94
7	2080	0.033229	0.001121	0.281453	0.000024	-46.7	-2.5	2527	2811	-0.97
8	2080	0.081556	0.002581	0.281529	0.000022	-44.0	-1.9	2520	2769	-0.92
9	2080	0.030770	0.001050	0.281522	0.000024	-44.3	0.0	2428	2653	-0.97
10	2080	0.059403	0.001935	0.281510	0.000023	-44.7	-1.6	2502	2755	-0.94
11	2080	0.032490	0.001096	0.281483	0.000026	-45.7	-1.4	2484	2742	-0.97
12	2080	0.040943	0.001364	0.281478	0.000028	-45.8	-2.0	2508	2776	-0.96
13	2080	0.075840	0.002551	0.281593	0.000028	-41.8	0.5	2425	2625	-0.92
14	2080	0.063012	0.002095	0.281567	0.000034	-42.7	0.2	2432	2643	-0.94
15	2080	0.067461	0.002252	0.281492	0.000027	-45.4	-2.7	2550	2822	-0.93
16	2080	0.044556	0.001485	0.281497	0.000017	-45.2	-1.4	2490	2744	-0.96
17	2080	0.021049	0.000818	0.281423	0.000016	-47.8	-3.2	2548	2850	-0.98
18	2080	0.048775	0.001595	0.281494	0.000019	-45.3	-1.7	2502	2760	-0.95
19	2080	0.063184	0.002079	0.281490	0.000025	-45.4	-2.5	2540	2810	-0.94
20	2080	0.046407	0.001535	0.281470	0.000022	-46.1	-2.5	2531	2807	-0.95
21	2080	0.023345	0.000822	0.281505	0.000019	-44.9	-0.2	2436	2670	-0.98
22	2080	0.073191	0.002413	0.281566	0.000026	-42.7	-0.3	2455	2673	-0.93
黑云母二长花岗岩 09LYK13										
1	2080	0.008471	0.000399	0.281310	0.000032	-51.8	-6.4	2672	3054	-0.99
2	2080	0.008459	0.000297	0.281489	0.000035	-45.5	0.1	2426	2656	-0.99
3	2080	0.005374	0.000157	0.281337	0.000025	-50.8	-5.1	2621	2976	-1.00
4	2080	0.010603	0.000455	0.281398	0.000022	-48.6	-3.3	2557	2866	-0.99
5	2080	0.034671	0.001478	0.281442	0.000030	-47.1	-3.2	2566	2859	-0.96
6	2080	0.012350	0.000497	0.281358	0.000024	-50.1	-4.8	2614	2957	-0.99
7	2080	0.000698	0.000021	0.281341	0.000023	-50.7	-4.8	2606	2956	-1.00
8	2080	0.026337	0.001019	0.281391	0.000022	-48.9	-4.3	2605	2930	-0.97
9	2080	0.000409	0.000014	0.281368	0.000024	-49.7	-3.8	2569	2895	-1.00
10	2080	0.024171	0.000983	0.281373	0.000024	-49.6	-5.0	2628	2968	-0.97
11	2080	0.008747	0.000335	0.281317	0.000022	-51.5	-6.0	2659	3035	-0.99
12	2080	0.003115	0.000113	0.281376	0.000018	-49.4	-3.6	2564	2885	-1.00
13	2080	0.009764	0.000380	0.281304	0.000024	-52.0	-6.6	2680	3067	-0.99
14	2080	0.003795	0.000134	0.281410	0.000020	-48.2	-2.4	2520	2813	-1.00
15	2080	0.017822	0.000744	0.281342	0.000024	-50.6	-5.7	2653	3014	-0.98
16	2080	0.006744	0.000251	0.281442	0.000030	-47.1	-1.5	2485	2754	-0.99
17	2080	0.002921	0.000094	0.281335	0.000020	-50.9	-5.0	2618	2973	-1.00
18	2080	0.034359	0.001288	0.281439	0.000025	-47.2	-3.0	2558	2849	-0.96
19	2080	0.011336	0.000446	0.281347	0.000023	-50.5	-5.1	2625	2977	-0.99
20	2080	0.013430	0.000495	0.281306	0.000023	-51.9	-6.6	2684	3071	-0.99
21	2080	0.001882	0.000080	0.281374	0.000021	-49.5	-3.7	2565	2888	-1.00
22	2080	0.018471	0.000682	0.281375	0.000026	-49.5	-4.5	2605	2938	-0.98
23	2080	0.009173	0.000284	0.281395	0.000024	-48.8	-3.2	2550	2858	-0.99
24	2080	0.001686	0.000062	0.281368	0.000022	-49.7	-3.8	2572	2899	-1.00
25	2080	0.004489	0.000184	0.281410	0.000020	-48.2	-2.5	2524	2817	-0.99
英云闪长岩 09QG03										
1	2511	0.000379	0.000014	0.281440	0.000021	-47.2	8.9	2473	2455	-1.00

续表 3

Continued Table 3

样品 点号	$t_{\text{Ma}}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
2	2511	0.000688	0.000026	0.281438	0.000023	-47.2	8.8	2476	2461	-1.00
3	2511	0.007657	0.000308	0.281441	0.000034	-47.2	8.4	2491	2485	-0.99
4	2511	0.000768	0.000033	0.281425	0.000031	-47.7	8.3	2494	2491	-1.00
5	2511	0.009083	0.000369	0.281437	0.000028	-47.3	8.2	2499	2499	-0.99
6	2511	0.001118	0.000049	0.281420	0.000031	-47.9	8.1	2502	2503	-1.00
7	2511	0.007338	0.000287	0.281412	0.000028	-48.2	7.4	2528	2546	-0.99
8	2511	0.001278	0.000056	0.281399	0.000030	-48.6	7.4	2530	2549	-1.00
9	2511	0.000275	0.000011	0.281396	0.000023	-48.7	7.3	2532	2552	-1.00
10	2511	0.007831	0.000320	0.281393	0.000032	-48.8	6.7	2555	2590	-0.99
11	2511	0.014882	0.000588	0.281392	0.000036	-48.9	6.2	2575	2621	-0.98
12	2511	0.000287	0.000013	0.281352	0.000026	-50.3	5.8	2590	2647	-1.00
13	2511	0.008148	0.000333	0.281365	0.000032	-49.8	5.7	2594	2653	-0.99
14	2511	0.011578	0.000453	0.281369	0.000027	-49.7	5.6	2596	2656	-0.99
15	2511	0.011672	0.000489	0.281370	0.000022	-49.6	5.6	2598	2658	-0.99
16	2511	0.012945	0.000506	0.281367	0.000025	-49.8	5.4	2603	2667	-0.98
17	2511	0.011705	0.000456	0.281363	0.000029	-49.9	5.4	2605	2670	-0.99
18	2511	0.015804	0.000629	0.281371	0.000022	-49.6	5.4	2606	2671	-0.98
19	2511	0.011603	0.000460	0.281359	0.000029	-50.1	5.2	2611	2681	-0.99
20	2511	0.014645	0.000570	0.281363	0.000034	-49.9	5.2	2613	2683	-0.98
21	2511	0.006367	0.000284	0.281345	0.000025	-50.5	5.0	2618	2692	-0.99
22	2511	0.026112	0.000958	0.281372	0.000026	-49.6	4.9	2627	2703	-0.97
23	2511	0.016082	0.000665	0.281351	0.000023	-50.3	4.6	2636	2719	-0.98
24	2511	0.014320	0.000560	0.281344	0.000030	-50.6	4.5	2638	2723	-0.98
25	2511	0.010125	0.000411	0.281332	0.000028	-51.0	4.4	2643	2733	-0.99
26	2511	0.013512	0.000509	0.281314	0.000033	-51.6	3.6	2675	2783	-0.98
27	2511	0.011359	0.000447	0.281291	0.000031	-52.4	2.9	2701	2826	-0.99
28	2511	0.012716	0.000508	0.281291	0.000037	-52.5	2.7	2706	2834	-0.98
英云闪长岩 09TL05										
1	2505	0.008750	0.000312	0.281464	0.000023	-46.3	9.2	2459	2434	-0.99
2	2505	0.011323	0.000430	0.281462	0.000071	-46.4	9.0	2470	2452	-0.99
3	2505	0.004780	0.000184	0.281404	0.000022	-48.5	7.3	2532	2553	-0.99
4	2505	0.009885	0.000397	0.281393	0.000021	-48.9	6.6	2561	2599	-0.99
5	2505	0.016317	0.000628	0.281375	0.000025	-49.5	5.5	2601	2663	-0.98
6	2505	0.005324	0.000192	0.281351	0.000018	-50.3	5.4	2603	2668	-0.99
7	2505	0.008213	0.000328	0.281354	0.000021	-50.2	5.3	2608	2676	-0.99
8	2505	0.013479	0.000512	0.281356	0.000024	-50.2	5.0	2619	2692	-0.98
9	2505	0.008794	0.000355	0.281343	0.000022	-50.6	4.9	2625	2703	-0.99
10	2505	0.020517	0.000739	0.281361	0.000026	-50.0	4.8	2627	2705	-0.98
11	2505	0.006074	0.000257	0.281334	0.000040	-50.9	4.7	2631	2713	-0.99
12	2505	0.008576	0.000347	0.281334	0.000024	-50.9	4.5	2637	2723	-0.99
13	2505	0.019287	0.000701	0.281350	0.000023	-50.4	4.5	2640	2725	-0.98
14	2505	0.010691	0.000420	0.281325	0.000021	-51.2	4.1	2654	2749	-0.99
15	2505	0.012686	0.000510	0.281327	0.000022	-51.2	4.0	2658	2755	-0.98
16	2505	0.013430	0.000501	0.281325	0.000026	-51.3	4.0	2660	2759	-0.98
17	2505	0.014757	0.000539	0.281324	0.000028	-51.3	3.9	2664	2765	-0.98
18	2505	0.010245	0.000404	0.281316	0.000021	-51.6	3.8	2665	2768	-0.99
19	2505	0.012033	0.000457	0.281311	0.000018	-51.7	3.5	2675	2784	-0.99
20	2505	0.016407	0.000609	0.281316	0.000026	-51.6	3.5	2679	2789	-0.98
21	2505	0.016644	0.000646	0.281315	0.000027	-51.6	3.4	2683	2795	-0.98
22	2505	0.011116	0.000429	0.281284	0.000025	-52.7	2.7	2709	2839	-0.99
23	2505	0.010781	0.000400	0.281243	0.000094	-54.1	1.2	2762	2926	-0.99

表4 恒山地区 TTG 片麻岩及钾质花岗岩 Sm-Nd 同位素分析计算结果

Table 4 Sm-Nd isotopic data of the potassic granites and the TTG gneisses in Hengshan Complex

样品号	岩石类型	$t_{Ga}$	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$ ( $2\sigma$ )	$\epsilon_{Nd}(t)$	$f_{Sm/Nd}$	$t_{DM1}(Ga)$	$t_{DM2}(Ga)$
09LYK06	角闪石二长花岗岩	2.06	16.5	97.6	0.1025	0.511240 ± 11	-2.12	-0.48	2.60	2.72
09LYK07	角闪石二长花岗岩	2.06	13.6	79.3	0.1034	0.511285 ± 12	-1.67	-0.47	2.58	2.68
09LYK08	角闪石二长花岗岩	2.06	16.0	95.6	0.1016	0.511256 ± 09	-1.76	-0.48	2.58	2.69
09LYK11	黑云母二长花岗岩	2.08	1.79	13.0	0.0836	0.511028 ± 09	-1.38	-0.58	2.48	2.66
09LYK13	黑云母二长花岗岩	2.08	3.32	29.5	0.0680	0.510718 ± 09	-3.29	-0.65	2.54	2.81
09XFT02	黑云母二长花岗岩	2.08	0.58	4.59	0.0767	0.510866 ± 09	-2.73	-0.61	2.54	2.77
09QG03	英云闪长岩	2.50	1.94	10.9	0.1082	0.511228 ± 10	0.77	-0.45	2.77	2.83
09TL01	英云闪长岩	2.50	2.45	20.7	0.0717	0.510732 ± 10	3.02	-0.64	2.58	2.65
09TL05	英云闪长岩	2.50	3.15	18.5	0.1034	0.511251 ± 13	2.96	-0.47	2.61	2.65
09TL08	英云闪长岩	2.50	1.59	10.2	0.0940	0.511110 ± 11	3.22	-0.52	2.58	2.63
09XHK01	英云闪长岩	2.50	1.88	10.4	0.1089	0.511311 ± 13	2.37	-0.45	2.66	2.70

计算公式:  $\epsilon_{Nd}(t) = ((^{143}Nd/^{144}Nd)_S - (^{147}Sm/^{144}Nd)_S \times (e^{\lambda t} - 1)) / ((^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR,0} - (^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR} \times (e^{\lambda t} - 1)) \times 10000$ ;  
 $f_{Sm/Nd} = [(^{147}Sm/^{144}Nd)_S / (^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR}] - 1$ ;  $t_{DM1} = 1/\lambda \ln \{ 1 + [ (^{143}Nd/^{144}Nd)_S - (^{143}Nd/^{144}Nd)_{DM} ] / [ (^{147}Sm/^{144}Nd)_S - (^{147}Sm/^{144}Nd)_{DM} ] \}$ ;  
 $t_{DM2} = 1/\lambda \ln \{ 1 + [ (^{143}Nd/^{144}Nd)_{DM} - (^{143}Nd/^{144}Nd)_S ] + [ (^{147}Sm/^{144}Nd)_S - (^{147}Sm/^{144}Nd)_{cc} ] \times (e^{\lambda t} - 1) / [ (^{147}Sm/^{144}Nd)_{DM} - (^{147}Sm/^{144}Nd)_{cc} ] \}$ . 计算采用的参数: 平均大陆地壳的  $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{cc} = 0.12$ ; 球粒陨石均一库的  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR,0} = 0.512638$ ,  $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR,0} = 0.1967$ ; 亏损地幔的  $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{DM} = 0.2137$ ,  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{DM} = 0.51315$

和 4 件围岩 TTG 片麻岩样品进行全岩 Sm-Nd 同位素分析 (表 4)。

角闪石二长花岗岩样品的  $^{147}Sm/^{144}Nd$  分布范围为 0.1016 ~ 0.1034,  $^{143}Nd/^{144}Nd$  在 0.51124 到 0.51128 之间,  $\epsilon_{Nd}(t)$  值介于 -2.2 ~ -1.7 之间, 平均值为  $-1.9 \pm 0.4$ , 单阶段模式年龄在 2.58 ~ 2.60Ga 之间, 平均为 2.59Ga。黑云母二长花岗岩样品的  $^{147}Sm/^{144}Nd$  介于 0.0680 ~ 0.0836 之间,  $^{143}Nd/^{144}Nd$  在 0.51086 到 0.51102 之间,  $\epsilon_{Nd}(t)$  变化范围为 -3.3 ~ -1.4, 平均值为  $-2.5 \pm 2.4$ , 单阶段模式年龄在 2.48 ~ 2.54Ga 之间, 平均为 2.52Ga。围岩 TTG 片麻岩的  $^{147}Sm/^{144}Nd$  介于 0.0717 ~ 0.1089 之间,  $^{143}Nd/^{144}Nd$  在 0.51073 到 0.51131 之间,  $\epsilon_{Nd}(t)$  变化范围为 1.2 ~ 8.9, 平均值为  $4.6 \pm 0.6$ , 单阶段模式年龄在 2.58 ~ 2.77Ga 之间, 平均为 2.64Ga。

## 5 讨论

### 5.1 花岗岩的形成时代

对角闪石二长花岗岩样品 09LYK06, 采用 LA-ICP-MS 和离子探针分析技术分别获得岩浆锆石  $^{207}Pb/^{206}Pb$  年龄加权平均值  $2052 \pm 17Ma$  和  $2084 \pm 4Ma$ , 二者在误差范围内非常接近。考虑到 Camecal280 型离子探针分析数据的可靠性, 可以认为角闪石二长花岗岩的形成时代为 2080Ma 左右。

对黑云母二长花岗岩样品 09LYK13, LA-ICP-MS 和离子探针 2 种方法获得的锆石 U-Pb 分析数据具有相似分布特点, 并且可以互补。落在谐和线上的数据点虽然不多, 对于岩浆结晶时代、源岩时代和变质作用时代仍然给出了基本一

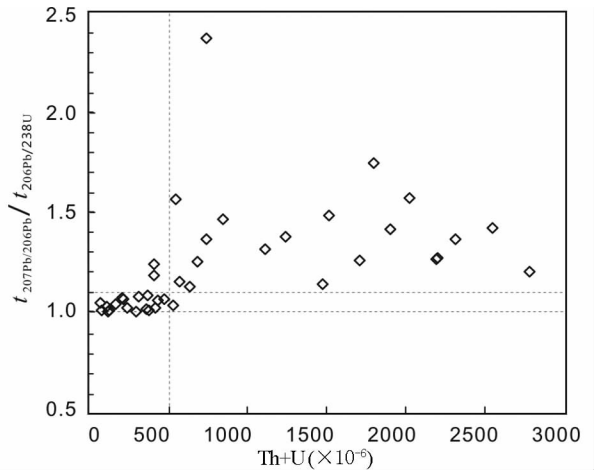


图5 U + Th 含量与年龄谐和性相关图

Fig. 5 U + Th contents vs.  $t^{207}Pb/^{206}Pb/t^{206}Pb/^{238}U$  ratios diagram

致的可靠限定。另外, 该样品的许多锆石都存在明显的铅丢失, 应该是 U、Th 含量过高所致。业已发现, U + Th 含量越高, 衰变能量越强, 对锆石晶格的损伤也越严重, 造成的铅丢失也越明显 (Williams and Hergt, 2000; Cherniak and Watson, 2001; 耿元生等, 2006)。由图 5 可见, 当黑云母二长花岗岩的锆石 U + Th 含量小于  $500 \times 10^{-6}$  时, U-Pb 年龄一般有较好的谐和性; 而当锆石 U + Th 含量大于  $500 \times 10^{-6}$  时, 数据的谐和度大部分变差, 正好符合上述规律。另外, 观察 U-Pb 谐和图发现 (图 4d), 该样品所有岩浆锆石 + 继承锆石的分析点均落于谐和线之下 2.5Ga 不一致线和 2.1Ga 不一致线之

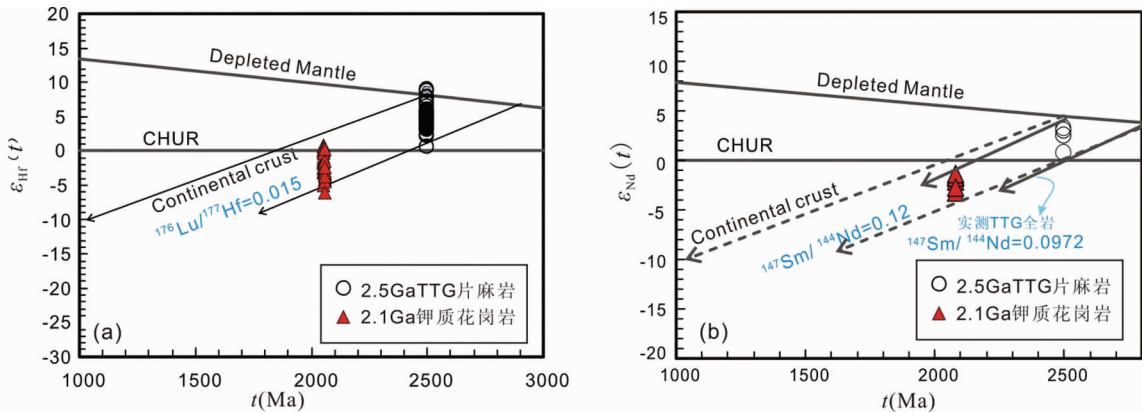


图6 恒山钾质花岗岩及TTG片麻岩锆石 Hf 同位素特征(a)和全岩 Nd 同位素特征(b)

Fig. 6 Zircon Hf isotopic features (a) and whole-rock Nd isotopic features (b) of the potassic granites and the TTG gneisses in Hengshan Complex

间。观察锆石阴极发光图像我们发现,所有获得较老年龄的数据点所对应的锆石均为继承锆石,且野外观察表明,花岗岩侵入于围岩 TTG 片麻岩中,明显晚于 TTG 岩石,综合考虑两种方法所得的数据分布特征我们认为:(1) 2.5Ga 的锆石是源岩锆石,2.1Ga 的部分熔融作用造成了 2.5Ga 锆石向 2.1Ga 不同程度的 Pb 丢失;(2) 分布于 2.5Ga 和 2.1Ga 之间的锆石由于高 U + Th 含量在晚近时代发生了较强的 Pb 丢失;(3) 该岩石是 2.5Ga 的源岩在 2.1Ga 熔融形成。即黑云母二长花岗岩来源于 2.5Ga 形成的陆壳,花岗岩形成时间大约 2.08Ga,经历了 1.85Ga 的麻粒岩相变质作用。

### 5.2 恒山钾质花岗岩的物质来源

本文研究及前人资料均表明,恒山地区主体 TTG 片麻岩的形成时代为 2500Ma 左右, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  均为正值,平均值为 5.3,与同时期亏损地幔的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值相近,模式年龄主要分布范围为 2500 ~ 2690Ma,表明恒山陆壳物质的主要部分是在此时期内由亏损地幔提取分异形成的。

对于钾质花岗岩与恒山 TTG 片麻岩的关系,由  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  与年龄的相关图(图 6a)上可以看出,恒山 2.08Ga 钾质花岗岩的 Hf 同位素亏损地幔模式年龄在 2.5 ~ 2.7Ga(表 3),Hf 同位素组成均落在 2.5 ~ 2.7Ga 古老陆壳的演化线上,并且  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  平均值为 -2.9,远远小于同时代亏损地幔  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值,排除了同期(2.1Ga)幔源物质的添加。同时,恒山的钾质花岗岩与围岩 2.5Ga TTG 片麻岩具有相同的锆石 Hf 同位素亏损地幔模式年龄(表 3)。全岩 Nd 同位素资料指示了同样的演化关系(图 6b、表 4)。因此,锆石 U-Pb 年龄资料和 Hf、Nd 同位素组成特点一致显示,恒山 2.08Ga 钾质花岗岩来源于以 TTG 片麻岩为代表的晚太古代陆壳物质。

### 5.3 构造背景

近年来,在华北克拉通中部带发表了很多 2.0 ~ 2.2Ga 的锆石 U-Pb 年龄数据。在恒山以南的阜平地区发育年龄为

2077 ± 13Ma 的南营花岗岩片麻岩(Zhao *et al.*, 2002);五台地区发育年龄为 2147 ± 5Ma 的基性岩墙(Peng *et al.*, 2005),王家会花岗岩中的粉色相年龄为 2084 ± 16Ma(Wilde and Zhao, 2005),溥沱群底部地层中的玄武安山岩年龄为 2140 ± 14Ma(Du *et al.*, 2010),侵入溥沱群的黄金山花岗岩年龄为 2137 ± 9Ma(杜利林,未发表资料)。在吕梁地区,吕梁群中上部近周营组变质玄武岩和杜家沟组变质流纹岩的时代为 2.2 ~ 2.1Ga(于津海等,1997),野鸡山群白龙山组火山岩的年龄为 2124 ± 38Ma;中条地区绛县群铜矿峪组变质火山岩年龄为 2155 ± 6 Ma(孙大中等,1991)。而在华北克拉通东部陆块胶辽地区,也存在 2.17Ga 的条痕状花岗岩(Li and Zhao, 2007)。这些资料表明,华北克拉通在 2.0 ~ 2.2Ga 之间存在一期广泛的岩浆热事件。

在这些已发现的 2.0 ~ 2.2Ga 岩浆事件中,黄金山花岗岩(杜利林,未发表资料)、辽吉花岗岩(路孝平等,2004;Lu *et al.*, 2006; Li and Zhao, 2007)与本文所研究的恒山钾质花岗岩,均具有 A 型花岗岩的典型特征,指示伸展构造背景;溥沱群底界的玄武安山岩具有陆内裂谷性质火山岩地球化学特征,与五台地区同时期壳源成因的花岗岩具有双峰式岩浆组合特征(Du *et al.*, 2010);阜平地区南营片麻岩中的二长-钾长片麻岩也具有板内花岗岩的地球化学特征(Liu *et al.*, 2005);中条地区,绛县群铜矿峪组中火山岩也具有裂谷特征(Sun *et al.*, 1990;孙大中等,1991);吕梁地区也发育有同时代基性-酸性双峰式火山岩。这些特征均表明,在 2.0 ~ 2.2Ga 之间的这期岩浆热事件发育于伸展背景之下,可能与陆内裂谷作用有关。

## 6 结论

通过对恒山地区钾质花岗岩及 TTG 片麻岩的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和全岩 Nd 同位素的研究,得出以下结论:

(1) 恒山地区发育一期古元古代钾质花岗岩,其形成时

代为~2080Ma,与围岩2.5Ga TTG片麻岩在~1.85Ga共同经历了高级变质作用。

(2)恒山钾质花岗岩中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -6.0 \sim 0.6$ ,说明它们来源于先存的地壳物质,而其Hf同位素亏损地幔模式年龄(2.5~2.7Ga)与恒山TTG片麻岩模式年龄(2.5~2.8Ga)范围一致,结合全岩Nd同位素结果,可以认为钾质花岗岩是恒山地区太古代地壳物质部分熔融的产物。

(3)综合区域研究资料可见,古元古代地壳重熔事件波及华北克拉通广大地区,包括恒山及邻区。这期岩浆热事件发育于伸展背景之下,可能与陆内裂谷有关。

**致谢** 感谢西北大学大陆动力学国家重点实验室弓虎军、第五春荣等老师以及中国科学院地质与地球物理研究所刘宇、李潮峰、李金荣、马红霞、唐国强、杨岳衡等老师在实验测试方面提供的帮助,感谢胡波博士、杜利林博士和笔者进行的有益探讨。两位审稿人对全文提出了宝贵的意见,让笔者受益匪浅,在此一并表示衷心感谢!

## References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192: 59–79
- Cherniak DJ and Watson EB. 2001. Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology*, 172: 5–24
- Du LL, Yang CH, Guo JH, Wang W, Ren LD, Wan YS and Geng YS. 2010. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite. *Chinese Science Bulletin*, 55: 1782–1789
- Geng YS, Yang CH and Wan YS. 2006. Paleoproterozoic granitic magmatism in the Luliang area, North China Craton: Constraint from isotopic geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 306–313 (in Chinese with English abstract)
- Guan H, Sun M, Wilde SA, Zhou XH and Zhai MG. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: Implications for formation and assembly of the North China Craton. *Precambrian Research*, 113: 1–18
- Guo JH, O'Brien PJ and Zhai MG. 2002. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China craton: Metamorphic evolution, *P-T* paths and geotectonic significance. *Journal of Metamorphic Geology*, 20: 741–756
- Iizuka T and Hirata T. 2005. Improvements of precision and accuracy in situ Hf isotope microanalysis of zircon using the laser ablation-MC-ICPMS technique. *Chemical Geology*, 220: 121–137
- Kramers SA and Tuller HL. 1995. A novel titanate-based oxygen-ion conductor-Gd $_{2}\text{Ti}_{2}\text{O}_{7}$ . *Solid State Ionics*, 82: 15–23
- Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005a. Age and evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 577–595
- Kröner A, Wilde SA, O'Brien PJ, Li JH, Passchier CW, Walte NP and Liu DY. 2005b. Field relationships, geochemistry, zircon ages and evolution of a Late Archean to Palaeoproterozoic lower crustal section in the Hengshan Terrain of northern China. *Acta Geologica Sinica*, 79: 605–632
- Li SZ and Zhao GC. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaqji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the eastern block of the North China craton. *Precambrian Research*, 158: 1–16
- Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10, Q04010, doi:10.1029/2009GC002400
- Li QL, Li XH, Liu Y, Tang GQ, Yang JH and Zhu WG. 2010. Precise U-Pb and Pb-Pb dating of Phanerozoic baddeleyite by SIMS with oxygen flooding technique. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25: 1107–1113
- Liu SW, Pan YM, Xie QL, Zhang J, Li QG and Yang B. 2005. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying granitic gneisses in the Fuping Complex: Implications for the tectonic evolution of the Central Zone, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 643–658
- Liu XM, Gao S, Diwu CR, Yuan HL and Hu ZC. 2007. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 $\mu\text{m}$  spot size. *Chinese Science Bulletin*, 52: 1257–1264
- Lu XP, Wu FY, Mang YB, Zhao CB and Guo CL. 2004. Emplacement age and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liaoji granites in Tonghua area, southern Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 381–392 (in Chinese with English abstract)
- Lu XP, Wu FY, Guo JH, Wilde SA, Yang JH, Liu XM and Zhang XO. 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton. *Precambrian Research*, 146: 138–164
- Ludwig KR. 2003. Mathematical-statistical treatment of data and errors for Th-230/U geochronology. *Uranium-Series Geochemistry*, 52: 631–656
- O'Brien PJ, Walte N and Li JH. 2005. The petrology of two distinct granulite types in the Hengshan Mts, China, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 615–627
- Peng P, Zhai MG, Zhang HF and Guo JH. 2005. Geochronological constraints on the paleoproterozoic evolution of the North China craton: SHRIMP zircon ages of different types of mafic dikes. *International Geology Review*, 47: 492–508
- Shen QH and Qian XL. 1995. Archean rock assemblages, episodes and tectonic evolution of China. *Acta Geoscientia Sinica*, 2: 113–120 (in Chinese with English abstract)
- Slama J, Kosler J and Crowley JL. 2007. Plesovice zircon: A new natural standard for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 71(15): 947–947
- Sun DZ, Hu WX, Tang M, Zhao FQ and Condie KC. 1990. Origin of Late Archean and Early Proterozoic rocks and associated mineral-deposits from the Zhongtiao Mountains, East-Central China. *Precambrian Research*, 47: 287–306
- Sun DZ, Li HM, Lin YX, Zhou HF, Zhao FQ and Tang M. 1991. Precambrian geochronology, chronotectonic framework and model of chronocrustal structure of the Zhongtiao Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 5: 23–37 (in Chinese with English abstract)
- Wang RM, Chen ZZ and Chen F. 1991. Grey tonalitic gneiss and high-pressure granulite inclusions in Hengshan, Ahanxi Province, and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 8: 119–131 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZH, Wilde SA and Wan JL. 2010. Tectonic setting and significance of 2.3~2.1Ga magmatic events in the Trans-North China Orogen: New constraints from the Yanmenguan mafic-ultramafic intrusion in the Hengshan-Wutai-Fuping area. *Precambrian Research*, 170(1–2): 73–87
- Wasserburg GJ, Jacobsen SB, Depaolo DJ, McCulloch MT and Wen T. 1981. Precise determination of Sm/Nd ratios, Sm and Nd isotopic abundances in standard solutions. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 45: 2311–2323
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Vonquadt A, Roddick JC and Spiegel W. 1995. 3 natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19: 1–23
- Wilde SA and Zhao GC. 2005. Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 519



-522

- Wilde SA, Cawood PA, Wang KY and Nemchin AA. 2005. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai Complex, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24:597-613
- Williams I and Hergt J. 2000. U-Pb dating of Tasmanian dolerites: A cautionary tale of SHRIMP analysis of high-U zircon. *Beyond 2000: New Frontiers in Isotope Geoscience*, Lorne, 2000; Abstract and Proceedings
- Wu FY, Zhao GC, Wilde SA and Sun DY. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24:523-545
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234:105-126
- Yu JH, Wang DZ, Wang CY and Wang LJ. 2004. Paleoproterozoic granitic magmatism and metamorphism in the middle Lvliang Mountain, Shanxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 10: 500-512 (in Chinese)
- Zhai MG, Guo JH, Li JH, Li YG, Yan YH and Zhang WH. 1996. Retrograded eclogites in the Archean North China Craton and their geological implication. *Chinese Science Bulletin*, 41:315-320
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 43:219-232
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1998. Thermal evolution of Archean basement rocks from the eastern part of the North China craton and its bearing on tectonic setting. *International Geology Review*, 40:706-721
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA, Min S and Lu LZ. 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton; Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103:55-88
- Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Sun M. 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex; Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *American Journal of Science*, 302:191-226
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton; Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136:177-202
- Zhao GC, Liu SW, Sun M, Li SZ, Wilde S, Xia XP, Zhang J and He YH. 2006. What happened in the Trans-North China Orogen in the period 2560~1850Ma? *Acta Geologica Sinica*, 80:790-806
- Zhao GC, Kroener A, Wilde SA, Sun M, Li SZ, Li XP, Zhang J, Xia XP and He YH. 2007. Lithotectonic elements and geological events in the Hengshan-Wutai-Fuping belt; A synthesis and implications for the evolution of the Trans-North China Orogen. *Geological Magazine*, 144:753-775
- Zhao GC, Wilde SA, Sun M, Guo JH, Kroener A, Li SZ, Li XP and Zhang J. 2008. Shrimp U-Pb zircon geochronology of the Huai'an Complex; Constraints on Late Archean to paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Trans-North China Orogen. *American Journal of Science*, 308:270-303

### 附中文参考文献

- 耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 2006. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作用——来自同位素年代学的证据. *岩石学报*, 22(2):306-313
- 柳小明, 高山, 第五春荣等. 2007. 单颗粒锆石的 20 $\mu$ m 小斑束原位微区 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和微量元素的同步测定. *科学通报*, 52(2): 228-235
- 路孝平, 吴福元, 张艳斌等. 2004. 吉林南部通化地区古元古代辽吉花岗岩的侵位年代与形成构造背景. *岩石学报*, 20(3):381-392
- 沈其韩, 钱祥麟. 1995. 中国太古宙地质体组成, 阶段划分和演化. *地球学报*, 2:113-120
- 孙大中, 李惠民, 林源贤等. 1991. 中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究. *地质学报*, 65(3): 216-231
- 王仁民, 陈珍珍, 陈飞. 1991. 恒山灰色片麻岩和高压麻粒岩包体及其地质意义. *岩石学报*, 8:119-131
- 于津海, 王德滋, 王赐银, 王丽娟. 2004. 山西吕梁山中段元古代花岗岩岩浆活动和变质作用. *高校地质学报*, 10: 500-512