张家口地区桑干杂岩中花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素特征及其对华北克拉通早期演化的制约*

李创举[1,2] 包志伟[1**] 赵振华[1] 乔玉楼[1]

LI ChuangJu[1,2], BAO ZhiWei[1**], ZHAO ZhenHua[1] and QIAO YuLou[1]

1. 中国科学院广州地球化学研究所成矿动力学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*

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

2011-11-20 收稿, 2012-02-01 改回.

Li CJ, Bao ZW, Zhao ZZ and Qiao YL. 2012. Zircon U-Pb age and Hf isotopic compositions of the granitic gneisses from the Sanggan complex in the Zhangjiakouk area: Constraints on the early evolution of North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4):1057 – 1072

Abstract The Sanggan metamorphic complex in the northwestern Hebei Province consists mainly of mediate- to high-grade metamorphic rocks, including granodioritic, monzonitic and banded gneisses. It is located to the south of the Chicheng-Chongli fault and to the north of the Huai'an metamorphic complex. SHRIMP and LA-ICPMS zircon U-Pb dating results reveal that the granodioritic gneisses were formed at 2.54 ~ 2.50Ga, while the K-rich monzonitic gneisses were emplaced at about 2.44Ga. An important metamorphic event of 2.37 ~ 2.30Ga was recorded in the zircons from the banded gneisses. The granodioritic geneisses exhibits rather radiogenic Nd ($\varepsilon_{Nd}(t) = -1.06$) and Hf (average $\varepsilon_{Hf}(t)$ of zircon = −1.6), suggesting the involvement of recycled old crustal material in origin. The K-rich monzonlitic geneisses are characterized by high SiO_2, low $Mg^{\#}$ and more radiogenic Nd ($\varepsilon_{Nd}(t) = -0.39 \sim +0.92$) and Hf ($\varepsilon_{Hf}(t) = +0.11 \sim +1.85$) compositions. They were considered to be formed through melting of earlier tonalite and underplated mafic magmas under amphibolite-facies conditions, with an important contribution of juvenile crustal component. Combined with the previous geochronological and geochemical studies on these metamorphic complexes, we proposed that the study area was in a post-collional tectonic setting during 2.50 ~ 2.40Ga, and that it was metamorphically overprinted at 2.37 ~ 2.30Ga in response to lithospheric extension.

Key words Sanggan complex; Zircon U-Pb dating; Granitic geneiss; TTG; Northwestern Hebei province

摘 要 冀西北崇礼地区的桑干变质杂岩位于赤城-崇礼断裂以南,怀安杂岩东北侧,主要为一套遭受强烈变质,普遍达到角闪-麻粒岩相的中高级变质岩系。锆石 U-Pb 定年结果显示,花岗闪长质片麻岩的原岩形成年龄为 2.54 ~ 2.50Ga;富钾的二长花岗质岩浆侵位时代为 ~ 2.44Ga;二者都在 2.37 ~ 2.30Ga 经历了一次重要的变质事件。花岗闪长质片麻岩相对较低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值 (−1.06),锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$值 (平均值为 −1.6) 以及较老的 Hf 模式年龄表明其原岩的形成源区含有更古老地壳物质,反映了该区或周围地区可能存在 3.0 ~ 2.9Ga 的基底。二长花岗质片麻岩的地球化学特征 (如高 SiO_2、K、低 $Mg^{\#}$等) 以及相对较高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值 (−0.39 ~ +0.92) 和锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$值 (+0.11 ~ +1.85) 表明其源区含有大量的新生地壳物质,可能为早期 TTG 质岩石部分熔融的产物。结合前人对华北克拉通中部构造带的研究资料,我们认为 ~ 2.44Ga 左右富钾质的岩浆活动可能反映了中部构造带局部发生的碰撞后构造背景,而 2.37 ~ 2.30Ga 该地区可能包括整个中部构造带经历了一次变质热事件,与区域广泛的伸展作用相关。

关键词 桑干杂岩;锆石年龄;花岗质片麻岩;TTG;冀西北

中图法分类号 P588.121; P597.3

---

* 本文受国家重点研究发展计划(2006CB403504)资助.

第一作者简介: 李创举,男,1984 年生,博士生,矿床学专业,E-mail: lichuangju123@163.com

** **通讯作者**:包志伟,男,1963 年生,博士,副研究员,从事岩石及矿床地球化学研究,E-mail: baozw@gig.ac.cn

1 引言

华北克拉通在太古代-古元古代期间的构造演化一直是学术界广泛关注的焦点（Wilde *et al.*, 1997; 赵国春等, 2002; Zhai and Liu, 2003; Kusky and Li, 2003; Kröner *et al.*, 2005; Zhai *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2001, 2002, 2005; 赵国春, 2009; Zhai and Sontosh, 2011; Kusky, 2011）。但是关于华北克拉通基底微陆块的划分、拼合方式以及拼合时间的认识目前仍存在很大分歧。如，Zhai *et al.*（2000）和 Zhai and Sontosh（2011）主张将华北克拉通化分成不同的微陆块，这些微陆块的拼合主要发生在新太古代 2.5Ga 左右；Zhao *et al.*（2000, 2002, 2005）主张将华北克拉通分为东部陆块、西部陆块和中部构造带，两陆块沿中部构造带的碰撞对接发生在 1.85Ga 左右，而 Kusky and Li（2003）则认为东西陆块的碰撞发生在 2.5Ga 左右。华北克拉通太古代-早元古代岩浆演化能为解决这些分歧和探讨华北克拉通早期构造演化过程提供重要线索。近年来不少研究者对华北克拉通出露的 TTG 质岩石和富钾的花岗岩-花岗闪长岩-二长花岗岩（GGM）进行了相关研究，并取得了一些重要认识（Zhang *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2011; Wan *et al.*, 2011）。

冀西北张宣地区位于中部构造带北部，区域上出露了大面积前寒武纪变质基底（Zhai *et al.*, 1992; 翟明国等, 1994, 2001; 郭敬辉等, 1994, 1996; 张宗清等, 1996; 刘敦一等, 1997; 刘树文等, 2007a, b）。前人的研究表明，这一地区可能经历了与华北克拉通中部带类似的古元古代晚期的构造演化，但是新太古代-古元古代早期的地质演化相对五台-阜平-恒山地区可能更加复杂（刘树文等, 2007a, b），探讨这一地区的岩浆演化对于认识整个华北克拉通早前寒武纪地质演化过程具有重要意义。本文试图在前人研究的基础上，通过对崇礼地区桑干变质杂岩（原定名为桑干群涧沟河组）中的花岗闪长质片麻岩、二长花岗质片麻岩的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学以及 Nd、Hf 同位素研究，探讨这些岩石的成因过程和该区新太古代-早元古代地质特征以及构造演化过程。

2 区域地质概况与样品岩相学特征

2.1 地质概况

依据 Zhao *et al.*（2005）对华北克拉通早前寒武纪基底

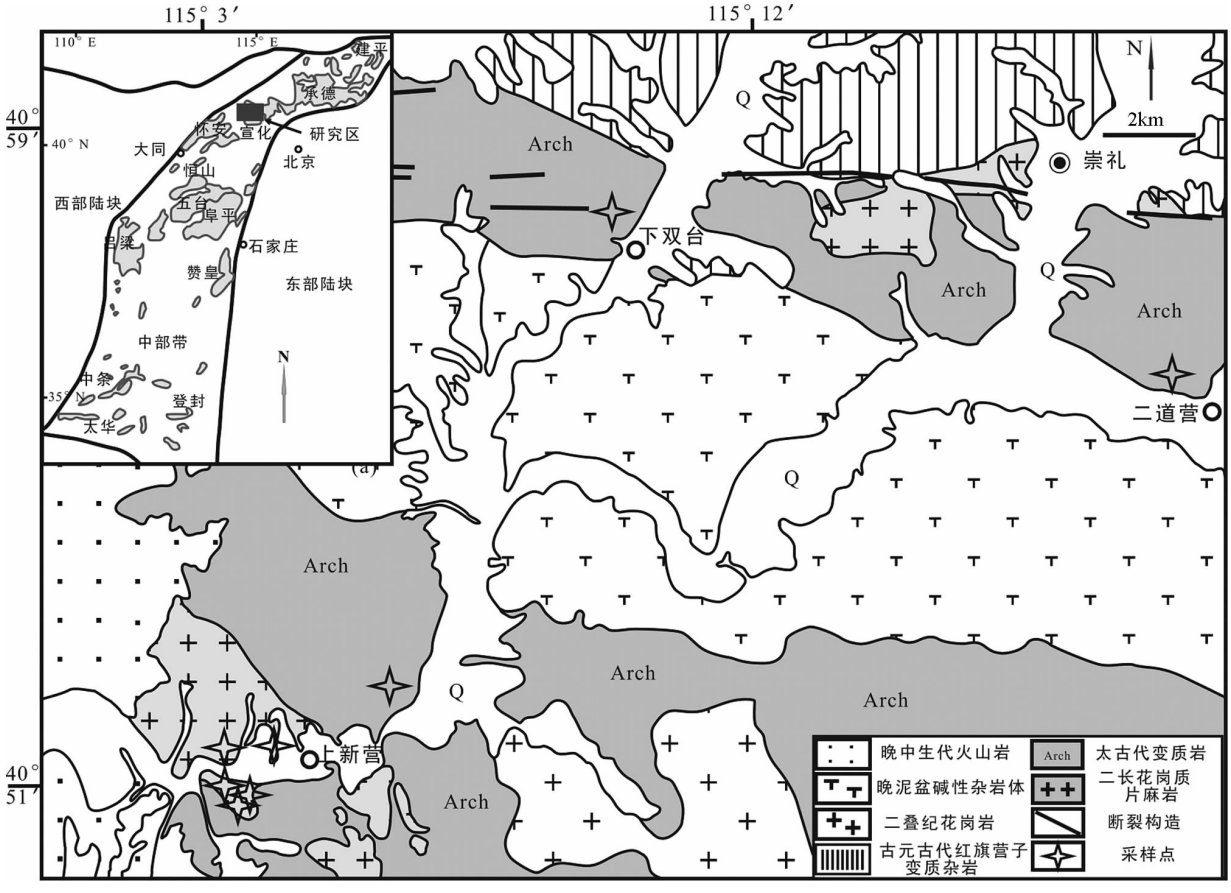


图 1 崇礼地区的大地构造位置简图（a）和采样位置（b）

Fig. 1 The tectonic setting and geological sketch map of the Chongli area (a) and sample locations (b)

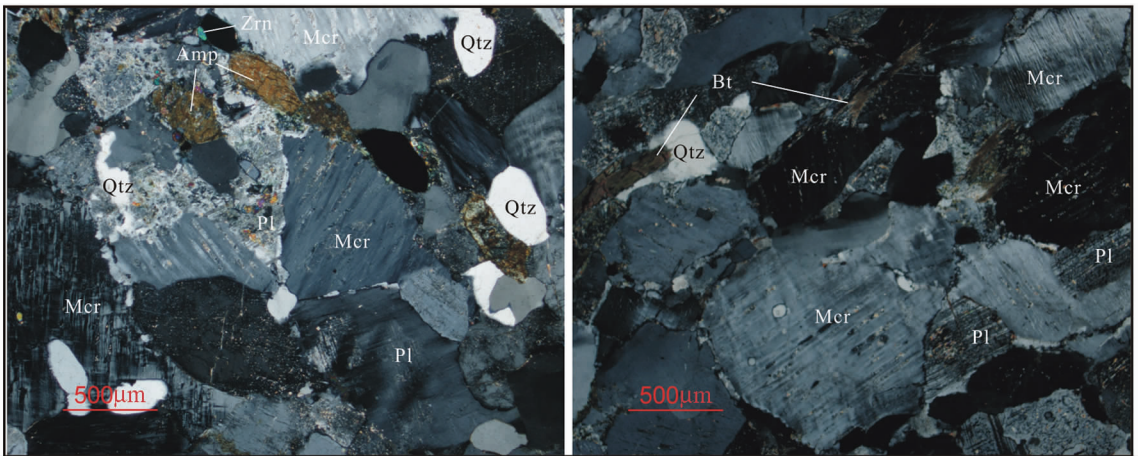


图 2　二长花岗质片麻岩显微照片

Mcr-条纹长石；Pl-斜长石；Amp-角闪石；Bt-黑云母；Zrn-锆石；Qtz-石英

Fig. 2　Microphotographs of the monzonitic granitic geneisses

Mcr-microcline; Pl-plagioclase; Amp-amphibole; Bt-biotite; Zrn-zircon; Qtz-quartz

的划分，该地区位于中部构造带北部，怀安杂岩的东北部（图 1）。这一地区出露了较大面积的早前寒武纪变质基底，通常称为桑干片麻岩或桑干杂岩，主要为一套遭受强烈变质，普遍达到角闪-麻粒岩相的中高级变质岩系。一些学者曾把它们归于怀安陆块的一部分（翟明国等，1994），而刘树文等（2007b）把它们归于单塔子杂岩，也有学者认为它们属于深变质绿岩带（王仁民和董卫东，1999）。1984 年河北省地质三队 1∶5 万地质测量报告将该地区出露的太古代变质杂岩称之为桑干群且自上而下划分为西噶峪组、水地庄组、化家营组、涧沟河组和艾家沟组。涧沟河组在崇礼地区出露最为广泛，主要分布在崇礼-赤城断裂以南，西望山-西葛峪-龙关以北的广大地区，在北部与古元古代红旗营子群呈断层接触。涧沟河组主要岩石类型基性麻粒岩、斜长角闪岩、黑云片麻岩以及条带状片麻岩、英云闪长质片麻岩和花岗质片麻岩（翟明国等，1994），原岩主要为中基性的火山岩和少量沉积岩。早期的年代学显示这些基性火山岩的形成时代为 2.79Ga（Rb-Sr 等时线年龄，高励和高凡，1988），崇礼上新营变质岩 Sm-Nd 等时线年龄为 2.67Ga（张宗清等，1996），而近年来区域上花岗质片麻岩和一些斜长片麻岩的锆石 U-Pb 年代学资料显示，这些中酸性变质岩的原岩形成时代主要在 2.60～2.40Ga（刘树文等，2007b；Jiang *et al.*，2010）。详细的野外调查发现，在崇礼地区零星出露了一些肉红色二长花岗质片麻岩，如在崇礼县城西部附近、崇礼上新营等地都有小规模出露，这些二长花岗质片麻岩主要以小岩株形式侵入周围的斜长片麻岩或角闪岩中。本次的研究对象主要为原涧沟河组中的花岗闪长质片麻岩、条带状花岗片麻岩以及后期侵位的肉红色二长花岗质片麻岩。

2.2　采样位置和样品岩相学特征

二长花岗质片麻岩主要采集于崇礼县上新营附近，岩石呈肉红色，斑状变晶结构-花岗变晶结构，片麻状构造。矿物组成（图 2）主要为钾长石（30%～55%），石英（15%～30%）和斜长石（15%～20%），暗色矿物（5%～10%）主要为角闪石、黑云母及少量辉石；副矿物主要有锆石、榍石、石榴子石、磷灰石、钛铁矿等。其中，钾长石斑晶通常为碱性长石和条纹长石，以条纹长石为主，颗粒中常包含有斜长石、石英以及一些暗色矿物，同时局部也可见到少量反条纹长石。石英主要以不规则状或卵圆形颗粒分布于矿物颗粒间或被一些矿物颗粒包裹，另外在一些长石等矿物间隙中常见蠕虫状石英分布。斜长石颗粒相对于钾长石较小，主要为钠长石、更长石。暗色矿物在各个样品中分配不均一，有些样品角闪石含量明显高于黑云母，成定向排列，局部发育有角闪石和少量黑云母的暗色条带。依据镜下特征和能谱分析，角闪石主要为普通角闪石、透闪石、阳起石，而黑云母主要为富 Fe 质的黑云母。暗色矿物和一些长石发生了较明显的蚀变，角闪石、黑云母绿泥石化常见，少量角闪石中间发育绿帘石化而边缘发育黑云母化；部分斜长石和碱性长石发生泥化、绢云母化。另外在一些样品中可以清楚的看到矿物受动力作用而发生了断裂变形。

花岗闪长质片麻岩样品采集于崇礼西双台和二道营口附近，D-03 手标本为灰绿色，受后期改造强烈，蚀变较强。主要矿物为石英（20%）、斜长石（35%）、钾长石（25%），另外含少量白云母（2%），暗色矿物（10%～15%）主要为角闪石、黑云母，其中角闪石大多已蚀变成云母和绿泥石。副矿物为锆石、磷灰石、磁铁矿和钛铁矿等。镜下可以看到斜长石由于受到强烈挤压而断开的现象。D-53 在手标本上可看到明显的片麻理，浅色矿物为斜长石、石英和钾长石，暗色矿物主要为角闪石、黑云母。角闪石以及黑云母绿泥石化蚀变显著，蚀变的角闪石、黑云母以及蚀变形成的绿泥石呈定向排列构成片麻理。

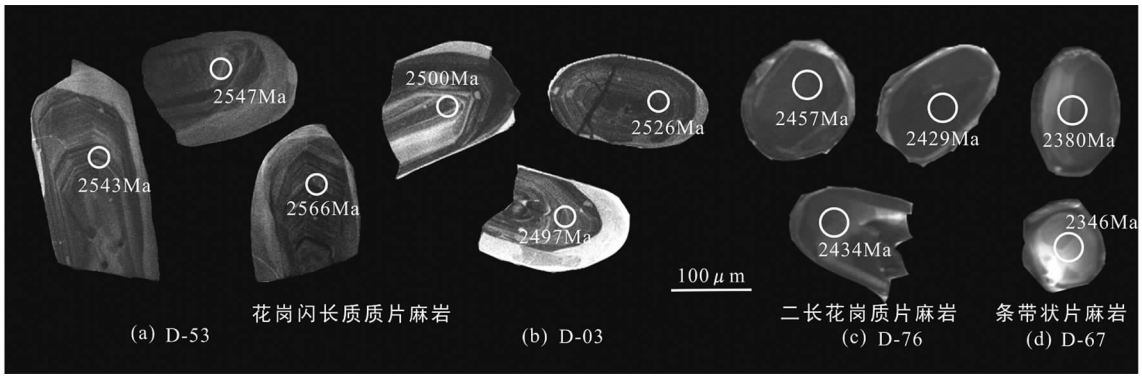


图 3 锆石 CL 图像

Fig. 3 CL images of representative zircons from the analytical samples

条带状花岗质片麻岩(D-67)采于崇礼三间房西侧河沟旁,浅色条带主要有呈定向排列的石英和长石组成,长石矿物主要为碱性长石。暗色矿物包括黑云母和少量角闪石,它们与白云母、少量斜长石呈细小片状或颗粒状呈条带分布;副矿物主要有锆石、磷灰石、榍石等。

3 分析方法

样品主、微量元素和 Nd 同位素的分析测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学国家重点实验室完成。主、微量元素分析分别是在 Rigaku ZSX 100e 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)和 PE Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)完成,其中主量元素的分析精度优于 1%,微量元素的分析精度大都好于 5%,详细分析流程以及方法见刘颖等(1996)。Nd 同位素分析在 MicroMass ISOPROBE 型多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)上完成,精度好于 0.002%,具体分析方法以及流程见 Li *et al.* (2002)。

选取两个花岗闪长质片麻岩样品(D-03 与 D-53)、一个条带状花岗质片麻岩样品(D-67)和一个二长花岗质片麻岩样品(D-76)做锆石测年和 Hf 同位素测定。将 5kg 左右的岩石样品破碎到 80 ~ 100 目,经常规浮选和磁选方法进行锆石分选,然后在双目镜下挑纯。将挑纯的锆石颗粒置于 DEVCON 环氧树脂中,待固结后抛磨至粒径的大约二分之一,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射光)照相。锆石阴极发光图像研究在中国科学院广州地球化学研究所 JXA-8100 电子探针仪上完成。

花岗闪长质片麻岩样品的 SHRIMP U-Pb 年龄测定在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心 SHRIMP Ⅱ上完成。测试过程采用的一次离子流强度约 10nA,离子束斑直径 30μm 左右。对同一测点均连续进行 5 次扫描分析,并将其加权平均作为该点的测试值。单个测点的分析误差为 $\pm 1\sigma$(表 1),最终年龄的加权平均值误差为 $\pm 2\sigma$。标样为 SL13 (572Ma, $^{238}U = 238 \times 10^{-6}$)和 TEM (417Ma),数据处理采用 Ludwig SQUID1102 和 ISOPLOT310 程序。详细的分析流程参见刘敦一等(2003)。锆石微区 Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石原位 Lu-Hf 同位素测定采用 Nu Plasma HR(Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪完成(MC-ICP-MS),详细的仪器运行条件和分析流程见 Diwu *et al.* (2008)。

二长花岗质片麻岩和条带状花岗质片麻岩样品(D-76 和 D-67)的 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素测定是利用配有激光剥蚀系统的 Neptune 多接收等离子体质谱仪(MC-ICPMS)和 Agilent 7500a 四极杆等离子体质谱仪(Q-ICPMS)进行同时原位分析。实验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完成。相关的仪器运行条件和分析流程可参阅 Xu *et al.* (2004)和 Xie *et al.* (2008)。

4 锆石 U-Pb 年代学

花岗闪长质片麻岩样品(D-03 和 D-53)的锆石形状多为不规则状或短柱状,长宽为 100μm × 100μm ~ 200μm × 150μm。CL 图像(图 3)显示这些锆石具有明显的核部和幔部构造,核部具有明显的环带韵律结构,幔部大多没有明显的环带,外侧是亮白增生边。锆石特征说明岩石形成后经历了至少两期变质改造作用。条带状花岗质片麻岩样品(D-67)的大多数锆石为短柱状,少数卵圆形,锆石核部一般看不到环带构造(图 3),可能经历了较强的变质作用影响。二长花岗质片麻岩样品(D-76)的锆石颗粒相对较大,多为不规则状,核部环带不清晰或不显示环带(图 3),大部分锆石显示了较厚的亮色变质边。花岗闪长质片麻岩样品的 SHRIMP U-Pb 定年测试结果见表 1。二长花岗质片麻岩和条带状花岗质片麻岩样品的锆石 LA-ICP-MS 测年结果见表 2。

花岗闪长质片麻岩(D-53)14 颗锆石 14 个分析点的 Th、U 和 Th/U 比值变化较小,分别为 $30 \times 10^{-6} \sim 212 \times 10^{-6}$、$136 \times 10^{-6} \sim 529 \times 10^{-6}$ 和 0.22 ~ 0.46 (表 1)。在锆石的 U-Pb 同位素谐和图上,大部分锆石都落在谐和线上或其附近,部分锆石可能存在放射成因铅丢失而分布于谐和线下方 (图4a)。

表 1　花岗闪长质片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年分析结果

Table 1　SHRIMP U-Pb zircon results for the granodioritic geneisses (sample D-03 and D-53)

测点号	$^{206}Pb_c$(%)	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	$\frac{^{232}U}{^{238}Th}$	$^{206}Pb^*$ ($\times10^{-6}$)	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ Age(Ma)	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ Age(Ma)	1σ	$\frac{^{207}Pb^*}{^{206}Pb^*}$	±%	$\frac{^{207}Pb^*}{^{235}U}$	±%	$\frac{^{206}Pb^*}{^{238}U}$	±%	error
D-03 花岗闪长质片麻岩																
D-03-1.1	0.04	338	126	0.38	110.0	2,074	±27	2268	± 8	0.1433	0.44	7.50	1.6	0.3794	1.5	0.963
D-03-2.1	-0.07	88	32	0.37	34.3	2,405	±34	2500	±13	0.1643	0.76	10.25	1.9	0.4523	1.7	0.916
D-03-3.1	0.00	93	75	0.83	28.4	1,964	±29	2043	±16	0.1260	0.89	6.19	1.9	0.3562	1.7	0.882
D-03-4.1	0.03	321	39	0.13	121.0	2,349	±32	2475	±10	0.1619	0.6	9.81	1.7	0.4396	1.6	0.937
D-03-5.1	0.00	419	163	0.40	163.0	2,412	±32	2526	±12	0.1668	0.7	10.44	1.8	0.4537	1.6	0.915
D-03-6.1	-0.03	50	167	3.44	21.7	2,631	±39	2594	±15	0.1737	0.91	12.07	2	0.5041	1.8	0.876
D-03-7.1	0.00	115	86	0.77	42.6	2,309	±32	2503	±11	0.1646	0.68	9.77	1.8	0.4306	1.6	0.919
D-03-8.1	0.01	371	151	0.42	157.0	2,573	±35	2562	± 6	0.1705	0.36	11.53	1.7	0.4906	1.7	0.977
D-03-9.1	0.15	53	79	1.52	21.8	2,504	±38	2544	±19	0.1687	1.2	11.04	2.2	0.4748	1.8	0.849
D-03-10.1	0.55	25	41	1.72	7.2	1,853	±35	2305	±53	0.1465	3.1	6.73	3.8	0.3331	2.2	0.477
D-03-11.1	0.02	623	116	0.19	267.0	2,605	±37	2575	±13	0.1718	0.76	11.79	1.9	0.498	1.7	0.911
D-03-12.1	0.35	34	26	0.79	12.1	2,223	±37	2365	±26	0.1517	1.5	8.61	2.5	0.4118	2	0.832
D-03-13.1	0.02	309	109	0.37	117.0	2,352	±30	2497	±8	0.1640	0.45	9.95	1.6	0.4402	1.5	0.960
D-03-13.2	0.00	92	64	0.72	30.6	2,112	±40	2264	±17	0.1430	0.97	7.64	2.4	0.3877	2.2	0.913
D-53 花岗闪长质片麻岩																
D-53-1.1	0.10	488	195	0.41	206.0	2,572	±32	2524	±6	0.1666	0.33	11.27	1.5	0.4903	1.5	0.978
D-53-2.1	0.04	231	64	0.28	95.9	2,541	±33	2536	±20	0.1679	1.2	11.18	2	0.4832	1.6	0.805
D-53-3.1	0.08	186	79	0.44	67.8	2,280	±30	2343	±10	0.1497	0.58	8.76	1.7	0.4242	1.6	0.941
D-53-4.1	0.07	345	165	0.50	105.0	1,948	±26	2077	± 9	0.1285	0.49	6.25	1.6	0.3528	1.5	0.955
D-53-5.1	0.03	529	211	0.41	221.0	2,559	±31	2543	± 5	0.1685	0.3	11.32	1.5	0.4872	1.5	0.980
D-53-6.1	0.07	230	68	0.30	95.2	2,531	±43	2547	± 8	0.1689	0.49	11.20	2.1	0.4808	2.1	0.975
D-53-7.1	0.08	194	41	0.22	77.3	2,451	±38	2502	±12	0.1644	0.69	10.49	2	0.4625	1.9	0.941
D-53-8.1	0.05	220	75	0.35	77.0	2,204	±39	2319	±14	0.1476	0.82	8.30	2.3	0.4077	2.1	0.932
D-53-9.1	0.04	382	149	0.40	119.0	1,993	±26	2148	± 8	0.1338	0.46	6.68	1.6	0.3623	1.5	0.959
D-53-10.1	0.00	136	30	0.23	57.6	2,576	±34	2582	±10	0.1724	0.62	11.68	1.7	0.4912	1.6	0.931
D-53-11.1	0.00	342	153	0.46	145.0	2,591	±32	2559	±18	0.1702	1.1	11.60	1.9	0.4946	1.5	0.820
D-53-12.1	0.04	374	152	0.42	140.0	2,336	±31	2473	± 8	0.1616	0.46	9.73	1.7	0.4368	1.6	0.962
D-53-13.1	0.01	286	97	0.35	112.0	2,414	±31	2471	± 7	0.1615	0.43	10.11	1.6	0.4541	1.6	0.964
D-53-14.1	0.00	481	212	0.46	197.0	2,508	±38	2566	±12	0.1709	0.71	11.20	2	0.4755	1.8	0.933

注：误差为 1σ，Pb_c 和 $^{206}Pb^*$ 分别代表普通铅和放射成因铅；普通铅校正用 ^{204}Pb 实测值

表 2 花岗质片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb zircon results for the granitic gneisses (samples D-76 and D-67)

测点号	Th ($\times10^{-6}$)	U ($\times10^{-6}$)	$\frac{^{238}U}{^{232}Th}$	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$ Age(Ma)	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$ Age (Ma)	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ Age (Ma)	1σ
D-76 二长花岗质片麻岩															
D76 01	409	392	0.96	0.1601	0.0011	10.4127	0.0672	0.4723	0.0051	2457	10	2472	6	2494	22
D76 02	286	829	2.9	0.1495	0.0009	8.5463	0.0495	0.4150	0.0043	2341	10	2291	5	2238	20
D76 03	277	796	2.88	0.1528	0.0010	9.0756	0.0549	0.4312	0.0046	2378	10	2346	6	2311	21
D76 04	377	372	0.99	0.1584	0.0033	9.9228	0.1675	0.4542	0.0057	2439	36	2428	16	2414	25
D76 05	290	814	2.8	0.1447	0.0009	8.1969	0.0483	0.4114	0.0043	2284	10	2253	5	2221	20
D76 06	155	251	1.62	0.1413	0.0014	7.8189	0.0728	0.4017	0.0049	2243	10	2210	8	2177	22
D76 07	266	615	2.31	0.1579	0.0010	9.8694	0.0596	0.4536	0.0048	2434	10	2423	6	2411	21
D76 08	278	1100	3.95	0.1546	0.0009	8.4365	0.0489	0.3962	0.0042	2397	10	2279	5	2152	19
D76 09	440	514	1.17	0.1557	0.0010	9.3714	0.0586	0.4367	0.0047	2410	10	2375	6	2336	21
D76 10	193	458	2.37	0.1575	0.0011	10.0492	0.0658	0.4631	0.0051	2429	10	2439	6	2453	22
D76 11	520	1261	2.42	0.1555	0.0009	9.2987	0.0518	0.4339	0.0046	2408	11	2368	5	2323	21
D76 12	525	671	1.28	0.1569	0.0010	9.6239	0.0581	0.4452	0.0048	2422	10	2399	6	2374	22
D76 13	887	1132	1.28	0.1572	0.0009	9.6799	0.0548	0.4468	0.0048	2426	11	2405	5	2381	21
D76 14	257	493	1.92	0.1459	0.0027	8.4539	0.1184	0.4203	0.0052	2298	33	2281	13	2262	24
D76 15	268	592	2.21	0.1522	0.0010	9.1191	0.0569	0.4348	0.0048	2371	10	2350	6	2327	21
D76 16	198	886	4.47	0.1534	0.0009	9.6195	0.0571	0.4549	0.0049	2385	11	2399	5	2417	22
D76 17	591	387	0.65	0.1516	0.0011	9.3738	0.0677	0.4487	0.0052	2364	10	2375	7	2390	23
D76 18	214	466	2.18	0.1442	0.0011	8.4321	0.0602	0.4242	0.0049	2278	10	2279	6	2280	22
D76 19	261	444	1.7	0.1475	0.0010	8.4346	0.0582	0.4148	0.0047	2317	10	2279	6	2237	22
D76 20	196	41	0.21	0.1122	0.0024	5.0474	0.0995	0.3265	0.0058	1835	16	1827	17	1821	28
D76 21	326	1363	4.18	0.1411	0.0009	7.6692	0.0480	0.3944	0.0044	2241	11	2193	6	2143	20
D76 22	154	126	0.82	0.1562	0.0015	10.0686	0.0929	0.4678	0.0059	2415	10	2441	9	2474	26
D76 23	246	651	2.65	0.1536	0.0010	9.5215	0.0620	0.4499	0.0051	2386	11	2390	6	2395	23
D76 24	293	841	2.87	0.1484	0.0009	8.3685	0.0516	0.4092	0.0046	2327	11	2272	6	2211	21
D-67 条带状花岗质片麻岩															
D67 1	296	118	0.4	0.1534	0.0015	9.8738	0.0913	0.4670	0.0059	2384	10	2423	9	2470	26
D67 2	152	74	0.49	0.1574	0.0021	10.0284	0.1248	0.4624	0.0068	2428	11	2437	11	2450	30
D67 3	175	72	0.41	0.1535	0.0019	9.2149	0.1076	0.4356	0.0061	2385	11	2360	11	2331	28
D67 4	234	231	0.99	0.1455	0.0037	8.5822	0.1804	0.4278	0.0060	2294	44	2295	19	2296	27
D67 5	324	227	0.7	0.1385	0.0013	7.4414	0.0642	0.3900	0.0048	2208	10	2166	8	2123	22
D67 6	138	457	3.32	0.1520	0.0009	9.1511	0.0566	0.4370	0.0049	2368	11	2353	6	2337	22
D67 7	356	159	0.45	0.1521	0.0014	9.1469	0.0785	0.4365	0.0054	2369	10	2353	8	2335	24
D67 8	81	42	0.52	0.1446	0.0023	8.3876	0.1229	0.4208	0.0067	2284	12	2274	13	2264	30
D67 9	284	60	0.21	0.1464	0.0023	8.2720	0.1195	0.4100	0.0064	2305	12	2261	13	2215	29
D67 10	231	165	0.71	0.1534	0.0015	9.9496	0.0911	0.4709	0.0059	2384	10	2430	8	2487	26
D67 11	190	398	2.09	0.1517	0.0010	9.0157	0.0609	0.4313	0.0049	2365	11	2340	6	2312	22
D67 12	845	1067	1.26	0.1451	0.0010	5.8458	0.0373	0.2924	0.0033	2289	11	1953	6	1654	16
D67 13	257	186	0.72	0.1489	0.0013	8.4452	0.0724	0.4117	0.0050	2333	10	2280	8	2223	23
D67 14	279	75	0.27	0.1511	0.0019	9.0401	0.1074	0.4343	0.0061	2358	11	2342	11	2325	28
D67 15	1940	1075	0.55	0.1479	0.0009	7.0595	0.0413	0.3464	0.0038	2322	11	2119	5	1917	18
D67 16	227	116	0.51	0.1486	0.0022	9.4041	0.1279	0.4595	0.0070	2330	12	2378	12	2437	31
D67 17	353	126	0.36	0.1530	0.0017	9.7568	0.1048	0.4630	0.0062	2380	10	2412	10	2453	27
D67 18	208	92	0.44	0.1473	0.0018	9.5207	0.1130	0.4692	0.0066	2315	11	2390	11	2480	29
D67 19	319	493	1.55	0.1533	0.0010	9.8168	0.0634	0.4648	0.0052	2383	11	2418	6	2461	23
D67 20	254	112	0.44	0.1413	0.0016	7.9470	0.0836	0.4083	0.0054	2243	10	2225	9	2207	24
D67 21	381	111	0.29	0.1500	0.0016	8.3709	0.0846	0.4051	0.0053	2346	10	2272	9	2193	24
D67 22	152	351	2.31	0.1522	0.0026	8.4574	0.0987	0.4030	0.0049	2371	29	2281	11	2183	22
D67 23	219	521	2.37	0.1545	0.0010	9.8496	0.0617	0.4630	0.0051	2396	11	2421	6	2453	22
D67 24	309	136	0.44	0.1547	0.0015	8.9950	0.0818	0.4222	0.0053	2398	10	2338	8	2271	24

注：误差为 1σ

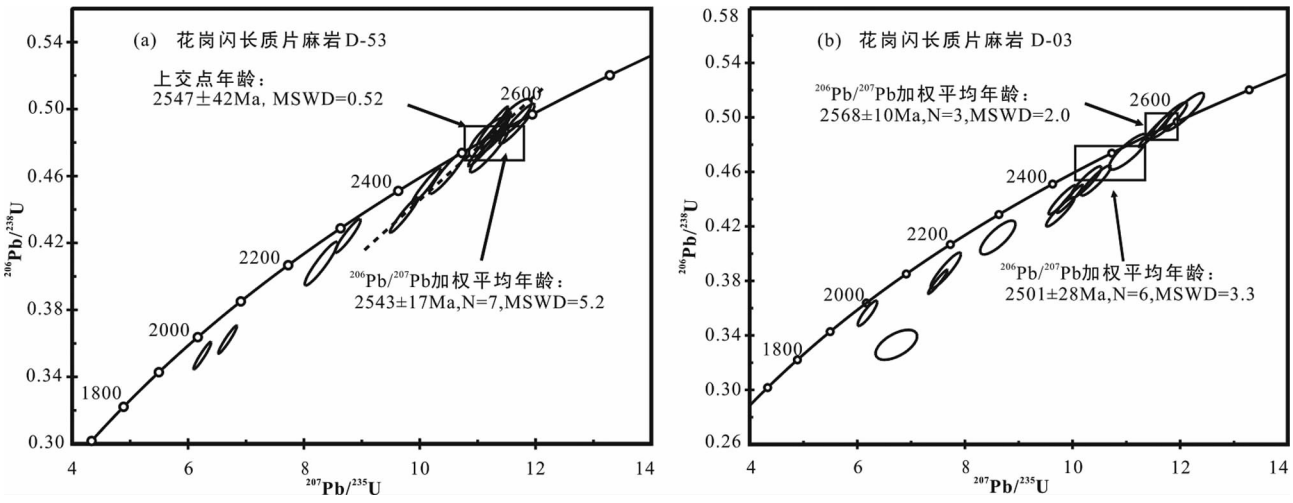


图 4　花岗闪长质片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和谐图

Fig. 4　$^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ concordant diagrams of zircons from the granodioritic geneiss (sample D-03 and D-53)

其中，位于锆石核部的 10 个分析点$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄在 2470～2580Ma 之间，这些点可以拟合成一条很好的等时线，其上交点年龄为 2547±42Ma，MSWD=0.52。在上交点附近谐和线上或靠近谐和线的七个点获得$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为 2543±17Ma，MSWD=5.2，和上交点年龄在误差范围内一致，说明该年龄比较准确可靠，代表了该片麻岩岩浆的侵位年龄。另外 4 个位于锆石边部的分析点显示了较年轻的年龄，其中两个分析点靠近和谐线下方附近，其$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄分别为 2342.9±10Ma，2319±14Ma，平均年龄为 2330Ma，可能代表了后期变质热事件的时代。

花岗闪长质片麻岩（D-03）共进行了 13 颗锆石 14 个点的 SHRIMP U-Pb 同位素分析。所测锆石的 Th、U 含量和 Th/U 比值变化较大，分别为 26×10^{-6}～167×10^{-6}、25×10^{-6}～623×10^{-6}和 0.13～3.44（表 1）。在锆石的 U-Pb 同位素谐和图上，大部分锆石都落在谐和线上或其附近，部分锆石可能存在放射成因铅丢失而分布于谐和线下方（图 4b）。其中锆石核部的 9 个分析点$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄在 2594～2475Ma 之间，这些锆石年龄可以分为两组，一组锆石显示了较老的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄，发育不规则环带或没有环带，三个分析点的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄分别为 2594±15Ma，2575±13Ma，2562±6Ma，这些锆石可能为片麻岩的源区残留锆石或来自捕获的围岩；另一组锆石年龄稍为年轻，位于和谐线附近的 6 个分析点获得$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为 2501±28Ma，MSWD=3.3，这些锆石显示了清晰的结晶环带，代表了该片麻岩原岩的侵位时代。另外有 4 个分析点位于锆石的变质增生边，它们具有低的 Th、U 含量，但是 Th/U 比值差异较大，有的远大于 0.4，最高达到 1.72。变质锆石通常显示低的 Th/U 比值（小于 0.1），而这些锆石变质增生边显示了较高 Th/U 比值，这一成因还有待进一步研究。4 个分析点的年龄都相对年轻，有 3 个分析点的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄在 2365～2264Ma 之间，集中在 2300Ma 左右，另外一个分析点$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为 2043±16 Ma，这些年龄可能代表了片麻岩原岩形成后经历的变质热事件的时代。

二长花岗质片麻岩样品（D-76）24 颗锆石 24 个分析点的 Th、U 和 Th/U 比值分别为 154×10^{-6}～887×10^{-6}、41×10^{-6}～1363×10^{-6}和 0.22～4.76，Th、U 含量相对较高，Th/U 比值集中在 0.3～1.2 之间（表 2）。在锆石的 U-Pb 同位素谐和图上，所有点基本上都落在谐和线上或谐和线附近（图 5a），大部分分析点的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄介于 2460～2320Ma 之间，这些分析点构成的不一致线所获得上交点年龄为 2435±32Ma，MSWD=1.17。靠近上交点附近的 11 个点获得$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为 2419±16Ma，MSWD=3.9，和上交点年龄在误差范围内是一致的，说明该年龄较可靠。这些分析点基本上都位于锆石核部，但是这些核部环带不清晰或不显示环带，这说明锆石形成之后可能经历了不同程度的变质重结晶，这一过程往往导致放射性成因铅的丢失。因此上交点年龄（2435±32Ma）可能更好的反映了该富 K 花岗片麻岩浆的侵位年代。另外，有 3 个分析点位于锆石亮白色增生边，其$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄分别为 2243±10Ma，2317±10Ma，1835±16Ma，这些年龄可能代表了富 K 花岗片麻岩原岩形成后经历的变质热事件的时代。

条带状花岗质片麻岩样品（D-67）24 颗锆石 24 分析点的 Th、U 含量和 Th/U 比值分别为 81×10^{-6}～1940×10^{-6}、42×10^{-6}～1075×10^{-6}和 0.30～4.76，Th、U 含量变化较大，Th/U 比值也相对较大，基本上都大于 1（表 2）。在锆石的 U-Pb 同位素谐和图上，大多数分析点落在谐和线上或谐和线附近（图 5b）。几乎所有分析点的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄都介于 2400～2300Ma 之间，其中 18 个分析点构成一条不一致线所获得的上交点年龄为 2366±20Ma，MSWD=2.2；$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为 2370±14Ma，MSWD=6.4。根据 CL 图像特征，这些锆石可能遭受了后期强烈的变质改造或是变质作用过程中形成的锆石，这一年龄值可能代表了古元古代一次较

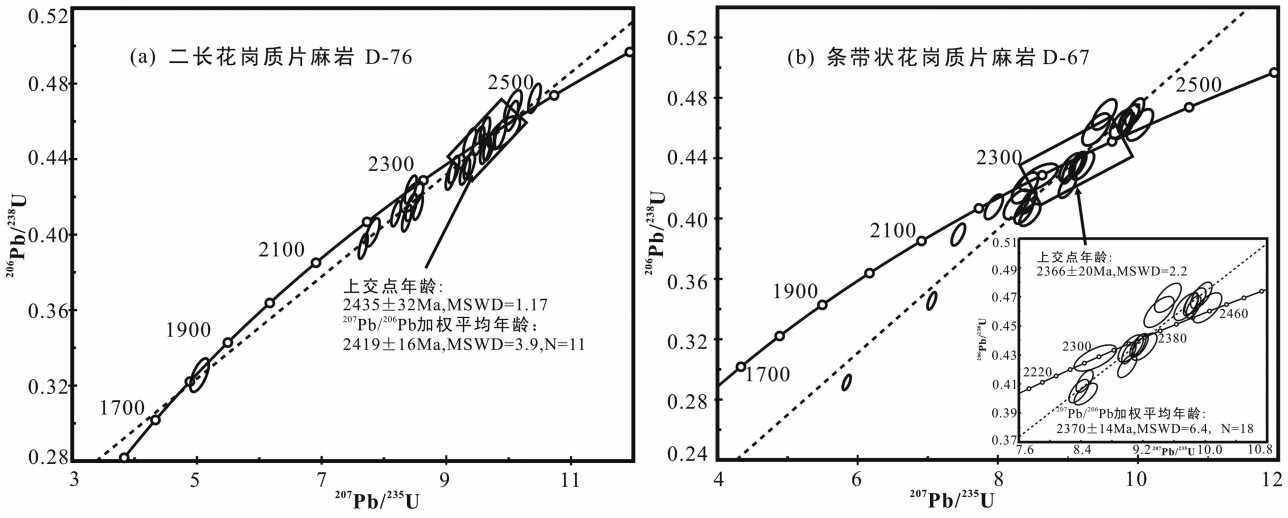


图 5 花岗质片麻岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄和谐图

Fig. 5 $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ concordant diagrams of zircons from the granitic geneiss (sample D-76 and D-67)

表 3 二长花岗质片麻岩主量(wt%)、微量和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 3 Major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) concentrations of the monzonitic granitic geneisses

样品号	D-71	D-72	D-74	D-75	D-76	样品号	D-71	D-72	D-74	D-75	D-76
SiO_2	68.15	65.13	68.02	68.74	71.45	Ho	0.64	0.87	0.32	0.18	0.47
TiO_2	0.60	0.49	0.64	0.54	0.37	Er	1.76	2.55	0.87	0.55	1.33
Al_2O_3	15.05	15.71	15.44	14.75	13.82	Tm	0.22	0.36	0.1	0.06	0.17
Fe_2O_3	3.44	3.90	2.99	3.07	2.69	Yb	1.53	2.58	0.62	0.54	1.09
MnO	0.05	0.06	0.02	0.03	0.04	Lu	0.25	0.37	0.09	0.08	0.18
MgO	0.58	0.91	0.83	0.80	0.90	Y	16.9	24.7	10.1	5.3	12.4
CaO	1.82	2.53	0.84	1.96	1.58	Rb	128	106	155	129	155
Na_2O	3.75	3.79	3.20	3.65	2.83	Sr	281	291	470	441	204
K_2O	5.53	5.02	5.97	5.36	5.18	Ba	1570	1295	1290	921	696
P_2O_5	0.11	0.13	0.24	0.18	0.10	Pb	20	22	18	18	19
LOI	0.72	1.81	1.60	0.73	0.82	Th	0.33	0.92	1.3	1.01	5.17
Total	99.80	99.47	99.78	99.79	99.76	U	0.2	0.48	0.41	0.38	0.36
A/CNK	0.97	0.96	1.16	0.96	1.05	Nb	10.8	13.1	9.2	5	7.7
$Mg^{\#}$	25	32	36	34	40	Ta	0.7	0.8	0.3	0.3	0.3
La	38.5	44.6	40.4	54	40.5	Zr	332	361	255	252	176
Ce	69.1	91.3	77.4	89.9	66.3	Hf	8.8	9.8	6.6	6.8	5
Pr	7.78	9.92	8.6	8.39	6.7	Ga	18.9	21.2	17.4	16.2	15.9
Nd	30.5	39.1	31.3	28.5	24.3	Cr	10	160	10	10	40
Sm	5.48	7.25	4.81	3.75	4.01	Co	108.5	6.7	40.1	58.1	35.9
Eu	1.65	1.6	1.9	1.83	0.98	Ni	5	13	6	6	10
Gd	4.52	5.75	3.7	2.86	3.44	Zn	55	63	46	38	35
Tb	0.65	0.87	0.43	0.29	0.49	V	17	40	38	41	35
Dy	3.22	4.46	1.76	1.08	2.34	δEu	1.01	0.76	1.38	1.71	0.81

注:A/CNK = Al/(Na + K + Ca)(摩尔比);$Mg^{\#} = 100 \times (Mg^{2+}/(Mg^{2+} + Fe^{2+}))$, Fe^{2+} 据全铁计算;δEu-球粒陨石标准化后 $Eu/(Sm \times Gd)^{1/2}$ 值

为强烈的变质热事件。

花岗闪长质花岗片麻岩-二长花岗质片麻岩-强变质的条带状花岗质片麻岩的锆石 U-Pb 年代学研究表明本地区至少存在 2.54 ~ 2.50Ga 花岗闪长质和 ~ 2.44Ga 二长花岗质两期岩浆活动。此外,岩浆锆石的变质增生边和条带状花岗质片麻岩中变质锆石年龄暗示区内在 2.37 ~ 2.30Ga 期间经历了一次强烈的变质热事件。

5 岩石地球化学特征

5.1 主、微量元素组成

对 5 个二长花岗质片麻岩样品进行了主、微量元素分析,结果见表 3。在 Q-A-P 图解中,这些样品基本上落在二长

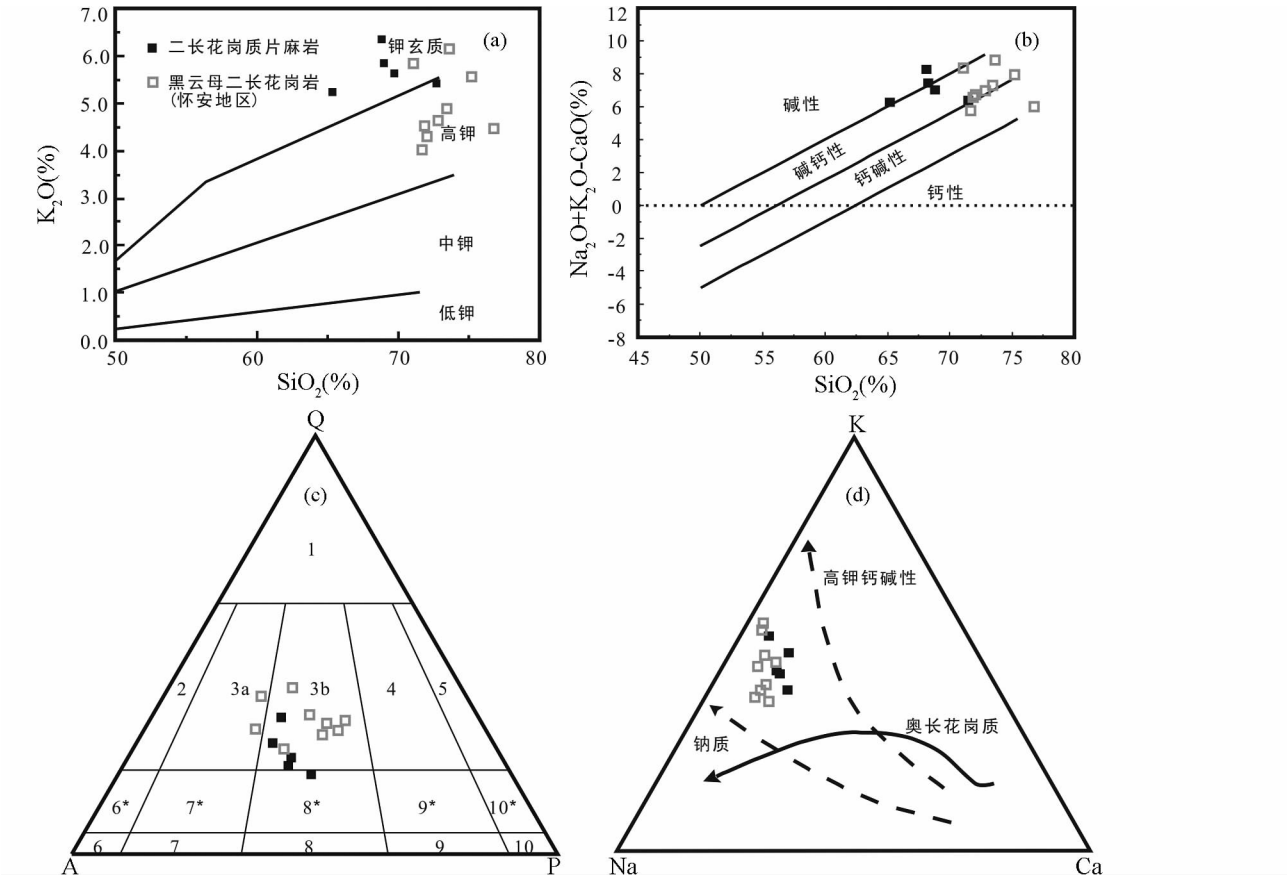


图 6　二长花岗质片麻岩的岩石化学特征

(a) K_2O vs. SiO_2 图解(据 Le Maitre *et al.*, 1989)；(b) Na_2O+K_2O-CaO vs. SiO_2 图解(据 Frost *et al.*, 2001)；(c) Q-A-P 图解：1-富石英花岗岩；2-碱性长石花岗岩；3a-正长花岗岩或普通花岗岩；3b-二长花岗岩；4-花岗闪长岩；5-英云闪长岩；6*-石英碱性长石正长岩；7*-石英正长岩；8*-石英二长岩；9*-石英二长闪长岩；10*-石英闪长岩；6-碱性长石正长岩；7-正长岩；8-二长岩；9-二长闪长岩；10-闪长岩；(d) K-Na-Ca 图解. 黑云母二长花岗岩数据引自 Zhang *et al.*, 2011

Fig. 6　Petrochemical features of the monzonitic granitic geneisses

花岗岩的范围（图 6c)；岩石总体富钾，具有较高的 K_2O/Na_2O 比值（1.3 ~ 1.8)，在 K_2O-SiO_2 图解中，主要落在高钾-钾玄质岩石系列中(图 6a)；相对富碱(Na_2O+K_2O 含量为 8.0% ~ 9.8%)，贫 Ca（CaO < 2.6%)，在 Na_2O+K_2O-CaO vs. SiO_2 图解中（图 6b)，所有样品都落在碱钙性-碱性的范围中；在 K-Ca-Na 图解中显示了向高 K 钙碱性系列演化的特征(图 6d)。这些样品显示了变化的 SiO_2 含量（65.1% ~ 71.5%)，总体贫 MgO、CaO、TiO_2，Al_2O_3 含量为 13.8% ~ 15.7%，A/CNK = 0.96 ~ 1.16，显示出准铝质-弱过铝质的特征，具有中等到低的 $Mg^{\#}$（25 ~ 40)，$Mg^{\#}$ 随 SiO_2 含量增大并无明显变化。总体来看，这些二长花岗岩质岩石样品显示了和怀安地区早元古代初期的黑云母二长花岗岩相似的特征(Zhang *et al.*, 2011，见图 6)。

二长花岗质片麻岩样品的稀土总量为 152×10^{-6} ~ 212×10^{-6}，稀土元素组成上显示了富集 LREE，轻重稀土分馏显著(LREE/HREE 比值为 10.9 ~ 33.0，$(La/Yb)_N$ 为 12.40 ~ 71.73)，弱的 Eu 负异常到正异常($\delta Eu = 0.76 \sim 1.71$)的特征(图 7a)；微量元素组成上(图 7b)，总体显示了富集大离子亲石元素(Rb、Ba)、LREE（La、Ce)，亏损 HFSE(Nb、Ta、Ti、P、Th、U)的特征。Fe_2O_3、CaO 与 Nb、Ta、Zr、Hf、Y、中重稀土随着 SiO_2 含量增高而逐渐降低可能反映了角闪石以及副矿物锆石、磷钇矿、榍石等的结晶分异作用；而 Sr，Ba 以及 Eu^*/Eu 值随岩浆演化无明显的变化趋势，说明岩浆形成过程中长石的分离结晶不显著。这些样品均显示了非常低的 Th、U 含量($Th < 5.17\times10^{-6}$，$U < 0.48\times10^{-6}$)，可能是受到后期变质作用的影响，因为在绿片岩相变质条件下富 Th、U 矿物褐帘石的破坏会导致花岗岩中 Th、U 的流失(Drüppel *et al.*, 2009)。

5.2　全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素特征

对二长花岗质片麻岩以及一个花岗闪长质片麻岩样品进行了 Nd 同位素分析，结果见表 4。其中二长花岗质片麻岩的初始 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值为 0.509375 ~ 0.509442，$f_{Sm/Nd}$ 值为 −0.62 ~ −0.48，亏损地幔模式年龄为 2.84 ~ 2.71Ga，对应

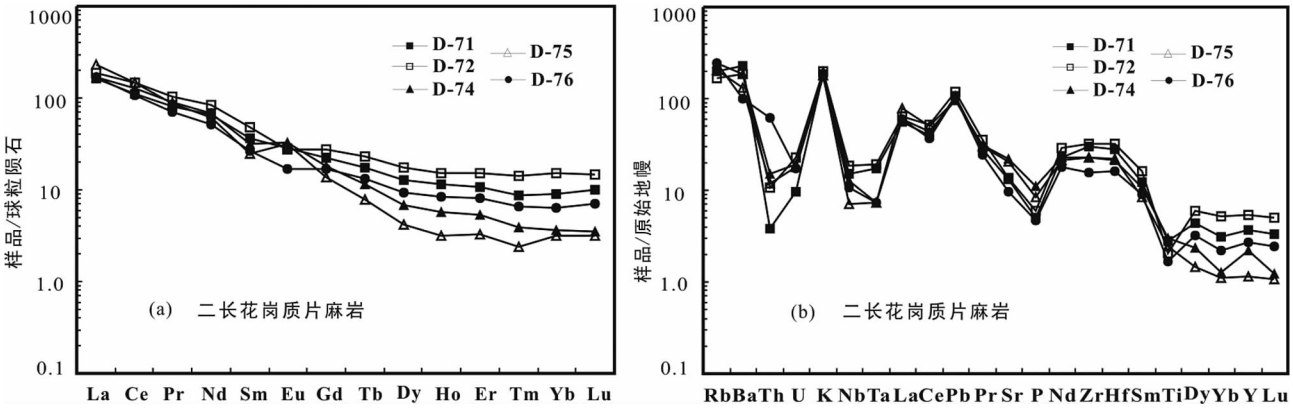


图 7 二长花岗质片麻岩的稀土元素和微量元素配分图(球粒陨石值和原始地幔值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 REE and trace elements patterns of the monzonitic granitic geneisses (chondrite data and primitive mantle data after Sun and McDonough, 1989)

表 4 花岗闪长质片麻岩和二长花岗质片麻岩的 Nd 同位素特征

Table 4 Nd isotope results of the granodioritic geneiss and monzonitic granitic geneiss

样品号	Sm ($\times10^{-6}$)	Nd ($\times10^{-6}$)	$^{143}Nd/^{144}Nd$	1σ	$^{147}Sm/^{143}Nd$	Nd ($t=2.5$Ga)	ε_{Nd} ($t=2.5$Ga)	t_{DM} (Ga)	$f_{Sm/Nd}$
D-53	8.54	45.5	0.511244	0.000004	0.12	0.509342	-1.06	2.94	-0.46
D-72	10.65	59	0.511229	0.000008	0.11	0.509399	0.08	2.83	-0.48
D-75	3.75	28.5	0.510776	0.000005	0.08	0.509442	0.92	2.71	-0.62
D-76	4.01	24.3	0.511048	0.000003	0.10	0.509375	-0.39	2.84	-0.53

的 $\varepsilon_{Nd}(t=2.50Ga)$ 为 -0.39 ~ 0.92;而花岗闪长质片麻岩的初始 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值为 0.509342,$f_{Sm/Nd}$ 值为 -0.46,亏损地幔模式年龄为 2.93Ga,对应的 $\varepsilon_{Nd}(t=2.50Ga)$ 为 -1.06。这些岩石的 Nd 同位素组成特征反映其岩浆成因有更古老的地壳物质的贡献。

样品的锆石 Hf 同位素分析结果见表 5。所有锆石颗粒的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值均很低(小于 0.001),说明锆石形成后接收放射性 Hf 积累量很低,能有效地代表岩石形成时源区的性质。我们分别计算了 Hf 同位素的单阶段模式年龄和二阶段模式年龄,由于锆石的 Lu/Hf 比值显著小于大陆地壳 Lu/Hf 比值,二阶段模式年龄能更好的反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间或其源区物质在地壳的平均存留年龄。

花岗闪长质片麻岩样品(D-03, D-53)锆石核幔部的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 初始比值变化范围在 0.281056 ~ 0.281246 之间。$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -5.8 ~ 1.3,平均值为 -1.6,单阶段 Hf 模式年龄(t_{DM1})变化在 3.04 ~ 2.74Ga 之间,平均值为 2.9Ga;二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})变化在 3.19 ~ 2.82Ga 之间,平均值为 3.01Ga。二长花岗质片麻岩(D-76)锆石 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 初始比值在 0.281232 ~ 0.281410 之间,靠近上交点附近的 11 个岩浆锆石核部分析点的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值变化范围在 0.11 ~ 1.85 之间,对应的单阶段 Hf 亏损地幔模式年龄为 2.73 ~ 2.66Ga,平均值为 2.71Ga,而二阶段 Hf 模式年龄 2.84 ~ 2.76Ga,平均值为 2.8Ga。锆石 Hf 同位素组成也反映在岩浆形成过程中有更古老地壳物质的贡献。由于条带状花岗质片麻岩(D-67)的锆石经历了强烈的变质改造,其 Hf 同位素组成并没有明确的地质意义。

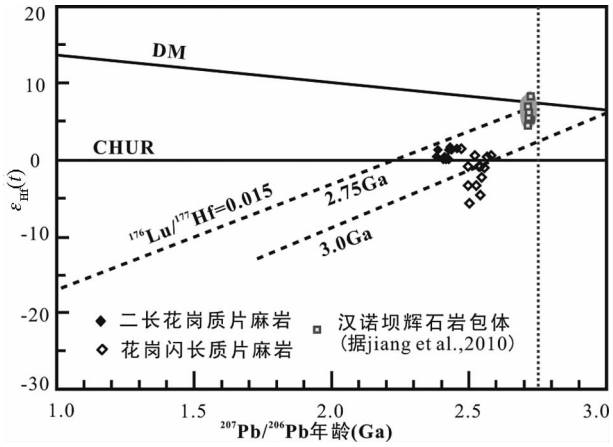


图 8 锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$-$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄图解

2.75Ga 锆石 Hf 同位素数据引自 Jiang *et al.* (2010)

Fig. 8 The plots of $\varepsilon_{Hf}(t)$ vs. crystallization age of the zircons

在 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值与年龄的图解中(图 8),二长花岗片麻岩的样品主要落在 3.00 ~ 2.75Ga 地壳演化线之间,而花岗闪长质片麻岩样品落在 3.00Ga 地壳演化线附近。综合前人的锆

表 5　花岗闪长质与二长花岗质片麻岩锆石的 Hf 同位素数据

Table 5　Hf isotope results for zircons from the granitic geneisses (samples D-76 and D-67)

测点号	Age(Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf_i$	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	t_{DM}(Ma)	t_{DM2}(Ma)	$f_{Lu/Hf}$
D-53 花岗闪长质片麻岩											
D-53-1.1	2524	0.014109	0.000578	0.281212	0.000017	0.281184	-55.2	0.4	2814	2901	-0.98
D-53-2.1	2536	0.009766	0.000414	0.281158	0.000023	0.281138	-57.1	-0.9	2875	2978	-0.99
D-53-5.1	2543	0.016045	0.000655	0.281060	0.000029	0.281028	-60.5	-4.7	3024	3167	-0.98
D-53-6.1	2547	0.015744	0.000645	0.281123	0.000029	0.281092	-58.3	-2.3	2939	3055	-0.98
D-53-10.1	2582	0.017219	0.000699	0.281181	0.000016	0.281146	-56.3	0.4	2865	2948	-0.98
D-53-11.1	2559	0.018338	0.000733	0.281153	0.000018	0.281117	-57.3	-1.1	2905	3006	-0.98
D-53-14.1	2566	0.014616	0.000587	0.281178	0.000029	0.281149	-56.4	0.2	2860	2948	-0.98
D-03 花岗闪长质片麻岩											
D-03-2	2500	0.027115	0.001148	0.281146	0.000016	0.281091	-57.5	-3.4	2946	3071	-0.97
D-03-4	2475	0.011865	0.000574	0.281267	0.000019	0.281240	-53.2	1.3	2740	2819	-0.98
D-03-5	2526	0.019523	0.000857	0.281116	0.000025	0.281075	-58.6	-3.4	2964	3091	-0.97
D-03-7	2503	0.025429	0.000962	0.281067	0.000027	0.281021	-60.3	-5.8	3038	3191	-0.97
D-03-9	2544	0.010789	0.000461	0.281152	0.000028	0.281129	-57.3	-1.1	2887	2990	-0.99
D-03-13	2497	0.012480	0.000553	0.281187	0.000013	0.281161	-56.0	-1.0	2846	2950	-0.98
D-76 二长花岗质片麻岩											
D76 01	2457	0.013046	0.000477	0.281283	0.000015	0.281261	-52.66	1.61	2711	2788	-0.99
D76 04	2439	0.013288	0.000496	0.281292	0.000018	0.281269	-52.35	1.48	2701	2780	-0.99
D76 07	2434	0.010744	0.000410	0.281301	0.000017	0.281282	-52.01	1.85	2682	2758	-0.99
D76 09	2410	0.013479	0.000503	0.281286	0.000016	0.281262	-52.57	0.59	2710	2800	-0.98
D76 10	2429	0.015965	0.000611	0.281302	0.000018	0.281273	-51.99	1.42	2696	2775	-0.98
D76 11	2408	0.021947	0.000828	0.281293	0.000016	0.281254	-52.32	0.27	2723	2815	-0.98
D76 12	2422	0.013421	0.000497	0.281271	0.000016	0.281248	-53.10	0.34	2730	2822	-0.99
D76 13	2426	0.016215	0.000607	0.281271	0.000013	0.281242	-53.10	0.25	2737	2830	-0.98
D76 16	2385	0.019843	0.000768	0.281311	0.000017	0.281276	-51.68	0.50	2694	2784	-0.98
D76 22	2415	0.010933	0.000417	0.281265	0.000016	0.281246	-53.30	0.11	2732	2828	-0.99
D76 23	2386	0.018852	0.000757	0.281334	0.000017	0.281300	-50.85	1.36	2662	2743	-0.98

注：表中锆石 Hf 同位素成分的计算所用的参数：Lu 衰变常数 $A = 1.856 \times 10^{-11}$，球粒陨石 $Lu/Hf = 0.0332$，$^{176}Hf/^{177}Hf = 0.282772$（Blichert-Toft and Alberede, 1997）；亏损地幔 $^{176}Lu/^{177}Hf = 0.0384$，$^{176}Hf/^{177}Hf = 0.28325$（Griffin *et al.*, 2000）；铁镁质和硅铝质地壳的 $f_{Lu/Hf}$ 分别是 -0.34（Amelin *et al.*, 2000）和 -0.72（Vervoort *et al.*, 1996）. t_{DM2} 所取的 $f_{Lu/Hf}$ 为硅铝质地壳的 -0.72（Vervoort *et al.*, 1996）

石 U-Pb 年代学和 Nd-Hf 同位素研究资料，在该区和相邻地区确实存在更古老（3.0～2.9Ga）的基底岩石（刘敦一等，1997；Jiang *et al.*, 2010），Zheng *et al.*（2004）在汉诺坝玄武岩的麻粒岩捕掳体中发现了 3.1～2.8Ga 的锆石 U-Pb 年龄，承德凤山以及河北东部也发现了较老的锆石 U-Pb 年龄记录（刘树文等，2007b；Nutman *et al.*, 2011）。

6　讨论

6.1　二长花岗质片麻岩的成因

二长花岗质片麻岩样品显示了富 LREE、弱到正的 Eu 负异常、高 Ba、中等高 Sr 和亏损 HFSE 的特征，可以和太古代 TTG 质岩石相类比，但是显著富钾，高 K_2O/Na_2O 比值（1.3～1.8）的特点与 TTG 质岩石不同，说明两者的源区与形成条件存在差别。这些岩石显示了中等高的 Sr 含量（204×10^{-6}～470×10^{-6}），说明部分熔融过程中有较多的长石进入了熔体相；Y 含量较大的变化范围（5.30×10^{-6}～24.7×10^{-6}），以及总体偏低的 $(La/Yb)_N$ 和 Sr/Y 比值（如相对低 SiO_2 样品（D-72）的 $(La/Yb)_N$ 值为 12.4，Sr/Y 比值为 11.8，显著低于 TTG 岩石），表明源区残留相中石榴子石含量较少，同时也说明这些岩浆形成深度相对 TTG 质岩石偏低。

这些岩石高 Si、富 K、富集 LILE，低 $Mg^{\#}$，亏损 Cr、Co、Ni、Nb、Ta、Ti、P 等元素的地球化学特征类似于世界上其他地区出露的新太古代高 K 花岗岩（Shang *et al.*, 2007, 2010；Almeida *et al.*, 2007；Drüppel *et al.*, 2009），表明它们可能具有相似的形成过程。新太古代高 K 花岗岩通常被认为是早期 TTG 片麻岩部分熔融的结果，实验岩石学研究也支持这一观点（Kleinhanns *et al.*, 2003；Lopez *et al.*, 2006）。但是这些二长花岗质样品较低的 SiO_2 含量（65.1%～71.5%），表明它们不可能单独由 TTG 质岩石通过低程度的部分熔融产生，熔融源区还应该存在基性组分的贡献。Lopez *et al.*（2006）对不同源区组分部分熔融形成的高 K 花岗岩的地球化学特征进行了实验模拟，在其建立的 A/CNK vs. K/Na 和 A/CNK vs. $Mg^{\#}$ 图解中（图 9），这些样品基本上都落在英云闪长岩脱水部分熔融到基性岩浆和英云闪长质地壳混合源

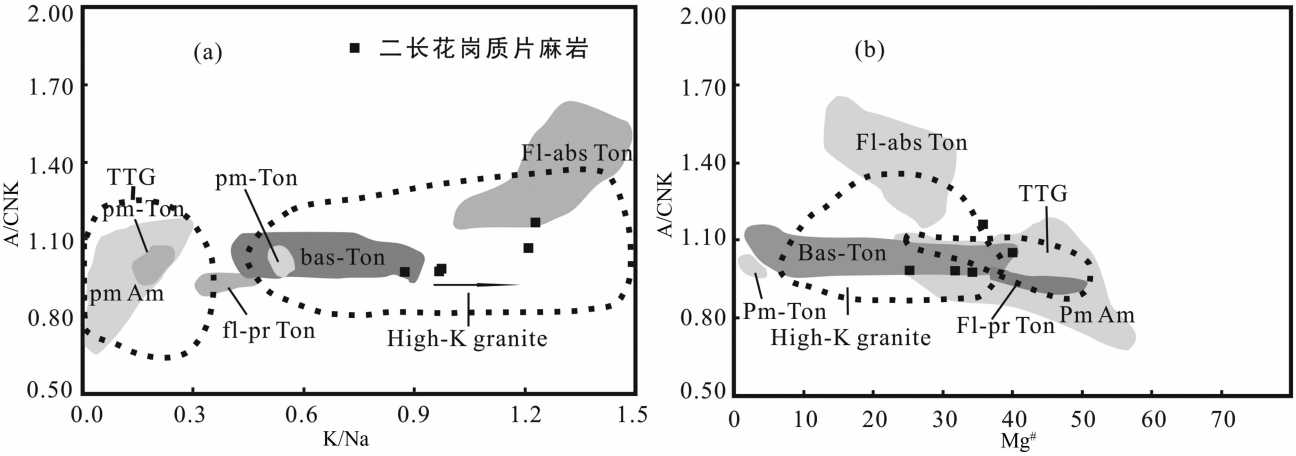


图 9 熔融源区示踪图解:K/Na - A/CNK 图解(a)和 $Mg^{\#}$-A/CNK 图解(b)(据 Lopez *et al.*, 2006)

图中灰色充填部分代表不同源区不同条件下形成的熔体:Pm Am-角闪岩的部分熔融;Pm-Ton-英云闪长岩的部分熔融;Fl-pr Ton 含水条件下英云闪长岩的部分熔融;Fl-abs Ton 贫水条件下英云闪长岩的部分熔融;Bas-Ton 基性岩浆与英云闪长岩相互作用

Fig. 9 K/Na vs. A/CNK (a) and $Mg^{\#}$ vs. A/CNK (b) plots (after Lopez *et al.*, 2006)

The partial melting of amphibolite (pm Am) and of tonalite (pm-Ton) under water-present (fl-pr Ton) as well as water-absent conditions (fl-abs Ton), and by the interaction between basic magma and tonalitic crust (Bas-Ton) are illustrated as grey shaded fields

区的范围。而富集的基性火山岩部分熔融或者地幔来源组分的加入通常用来解释偏中性的高 K 闪长岩-花岗闪长岩的成因(Lopez *et al.*, 2005; Martin and Moyen., 2005; Drüppel *et al.*, 2009),因此这些二长花岗质岩石的源区可能是由 TTG 组分与基性下地壳或幔源组分共同组成。

二长花岗质岩石较低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-0.39 ~ 0.92)、较大的 Nd 亏损地幔模式年龄(2.84 ~ 2.71Ga),以及与之相应的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ = 0.11 ~ 1.85、t_{DM1} = 2.73 ~ 2.66Ga 和 t_{DM2} = ~2.80Ga 的特征值,表明其岩浆源区主要为古老下地壳物质并可能含有一定的新生幔源组分。在 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值与年龄的图解中(图 8),这些样品主要落在 3.00 ~ 2.75Ga 地壳演化线之间。前人研究资料显示,2.70Ga 可能是华北克拉通早期一次重要陆壳生长期,如 Jiang *et al.* (2010)对汉诺坝玄武岩中辉石岩包体进行锆石激光测年获得了 2715 ± 21Ma 的年龄,并且这些锆石显示了亏损地幔的 Hf 同位素特征(图 9),这一发现反映该区存在 2.70Ga 左右的新生地壳。二长花岗质岩石的锆石 Hf 模式年龄与这一年龄相近,说明岩浆源区可能有 2.70Ga 左右形成的新生地壳的贡献。这些新生地壳与早期 TTG 质岩石的混合源区发生部分熔融形成了中酸性岩浆,其上升和侵位过程中发生一定程度的分离结晶作用。

6.2 对区域构造演化的指示意义

关于华北克拉通新太古代构造体制的性质和成因仍存在很大争议,基于不同地区的变质岩的变质变形构造、岩石组合以及年代学研究,一些学者提出了不同的构造演化模式。目前主要流行两种模式,即岩浆弧和地幔柱模式。地幔柱模式虽然能很好的解释华北克拉通东部区域上广泛分布的新太古代末期(2.56 ~ 2.50Ga)TTG 质岩浆活动与其变质作用时间(~2.50Ga)非常接近的特征(Yang *et al.*, 2008; Grant *et al.*, 2009; 赵国春, 2009),但是和华北克拉通东部相比,中部带至今没有确切的太古代末期的变质年龄记录(耿元生等, 2010)。总结区域上新太古代变质岩详细的 U-Pb 年代学资料(表 6)显示,怀安,宣化等地报道的 2.52 ~ 2.46Ga TTG 质岩浆活动,与该地区花岗闪长质岩浆活动的时间基本一致。根据 Liu *et al.* (2009)的研究,这些 TTG 质岩石显示了俯冲洋壳部分熔融的特征,表明新太古代区域上可能存在与洋壳俯冲相关的岛弧或大陆边缘弧的构造背景,而本文研究的花岗闪质片麻岩的源区存在大量的再循环的古老地壳物质,暗示该区可能与大陆边缘弧的构造背景有关。

一些研究者认为中部带的弧岩浆活动一直延续到早元古代末期,东西陆块之间的大洋直到 1.85Ga 才完全消失(Kröner *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2006)。但是,不少研究者对新太古代-早元古代末期长达 7 ~ 8 亿的构造岩浆旋回(或者 7 ~ 8 亿的长寿大洋)提出了质疑(陈斌等., 2006; 耿元生等, 2010; 张旗, 2011)。大量的壳融花岗岩浆活动(如高钾的 GGM 组合)以及强烈的变质作用是克拉通化完成的重要标志(Frost *et al.*, 1998; Kampunzu *et al.*, 2003; Moyen *et al.*, 2003; Zhai and Santosh, 2011)。本文获得的二长花岗质岩岩浆侵位(~2.44Ga)发生在区域 TTG 岩浆活动之后,与怀安地区出露的黑云母二长花岗岩(~2.44Ga)、紫苏辉石花岗岩(~2.46Ga)的岩浆活动时代基本一致(Zhang *et al.*, 2011),而且区域上变质年代学资料记录了 2.50 ~ 2.40Ga 期间的麻粒岩相变质作用(刘敦一等, 1997; 刘树文等, 2007b),表明 2.50 ~ 2.40Ga 期间该地区可能发生了局部的碰撞过程。嵩山地区 TTG 和高钾 GGM 岩石组合的成因研究

表 6 冀西北及其邻区新太古代变质岩年龄

Table 6 Summary of isotopic ages for Neoarchean metamorphic rocks in northwestern Hebei Province

岩石类型	采样位置	年龄值(Ma)	测年方法	资料来源
花岗片麻岩	崇礼上新营	2451 ±14	单颗粒锆石 U-Pb 法	刘敦一等,1997
基性麻粒岩	崇礼上新营	2512 ±55	全岩 Sm-Nd 等时线	张宗清等,1996
黑云花岗闪长片麻岩	崇礼红旗营子	2535 ±18	SHRIMP	刘树文等,2007a
花岗闪长质片麻岩	崇礼西双台	2568 ±10	SHRIMP	本文
花岗闪长质片麻岩	崇礼二道营口	2543 ±17	SHRIMP	本文
基性麻粒岩	赤城伙房村	2667 ±90	Sm-Nd 等时线年龄	张宗清等,1996
黑云斜长片麻岩	赤城北云城	2529 ±10	LA-ICPMS	刘树文等,2007a
花岗闪长质片麻岩	宣化谷嘴子村	2503 ±21	单颗粒锆石 U-Pb 法	刘敦一等,1997
花岗闪长质片麻岩	宣化张全庄	2517 ±7	SHRIMP	刘敦一等,1997
英云闪长岩(TTG)	宣化附近	2486 ±20	LA-ICPMS	Jiang *et al.*, 2010
麻粒岩捕掳体	汉诺坝玄武岩	2489 ~2447	LA-ICPMS	Zheng *et al.*, 2004
TTG 片麻岩	怀安地区	2520 ~2440	SHRIMP	Zhao *et al.*, 2008
TTG 片麻岩	怀安地区	2510 ~2470	LA-ICPMS	Liu *et al.*, 2009
TTG 片麻岩围岩	承德地区	2600 ~2530	SHRIMP	刘树文等,2007b
TTG 片麻岩	承德地区	2520 ~2470	SHRIMP 和 LA-ICPMS	刘树文等,2007b

也显示了类似的结果（周艳艳等, 2009; Zhou *et al.*, 2011），这些资料说明新太古-早元古代初期（2.50 ~ 2.40Ga）中部构造带局部可能存在弧-陆或者微陆块之间的碰撞拼接过程。

条带状花岗片麻岩的变质锆石以及花岗闪长片麻岩的锆石变质增生边的年龄测试结果显示,2.37 ~ 2.30Ga 期间该地区可能经历了一次强烈的变质热事件。刘树文等(2007b)对承德单塔子杂岩的年代学研究也发现了大量这一时期变质年龄的记录;在五台-阜平以及太华地区也都存在该时期的岩浆活动的记录(Kröner *et al.*, 2005; Wan *et al.*, 2003; 耿元生等, 2006; 第五春荣等, 2007)。这些年代学资料说明 2.37 ~ 2.30Ga 的热事件在这些地区,可能包括中部构造带都具有普遍的意义。一些学者曾对这次事件的性质进行了探讨,如耿元生等(2006)认为 2.36Ga 左右的盖家庄偏碱性花岗岩是古元古代早期拉张阶段岩浆活动的产物;Zhao *et al.*（2006）认为 2.30GaMa 左右的基性岩墙群是弧后盆地拉张的结果;而陈斌等(2006)认为从晚太古代到 2.30Ga 和 2.30 ~ 1.80Ga 可能为两次岩浆构造旋回。依据目前资料来看,2.37 ~ 2.30Ga 的热事件可能是新太古-早元古代初期(2.50 ~ 2.40Ga)局部碰撞之后发生的一次强烈伸展事件。

另外,本次测定的一些变质锆石的年龄结果亦反映出该地区存在 1.85Ga 左右的变质事件,这一点与前人的研究结果吻合。而该地区或附近地区前寒武纪变质岩几乎都有这次变质事件的记录（Zheng *et al.*, 2004; Guo *et al.*, 2005; Jiang *et al.*, 2010),它可能代表华北克拉通东西陆块最终碰撞发生的时间（赵国春等, 2002）。

7 结论

通过对桑干杂岩原涧沟河组花岗闪长质片麻岩、条带状花岗质片麻岩和二长花岗质片麻岩的地球化学、锆石 U-Pb 年代学以及 Nd-Hf 同位素研究,我们得到以下几点认识：

(1)崇礼地区花岗闪长质岩浆活动发生的时间和区域上 TTG 岩浆一致（2.54 ~ 2.50Ga)。而二长花岗质岩浆侵位在区域 TTG 岩浆活动之后（~2.44Ga),可能与区域上发生的麻粒岩相变质事件相对应;2.37 ~ 2.30Ga 该地区经历了一次强烈热扰动,可能与区域当时强烈的碱性岩浆和镁铁质岩浆活动相关。

(2) 2.54 ~ 2.50Ga 的花岗闪长质片麻岩具有较低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$(-1.06)和锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$(平均值为 -1.6)以及较老的 Hf 模式年龄,表明其熔融源区含有大量古老再循环地壳物质,反映当时区域上存在 3.0 ~ 2.9Ga 的古老陆壳。

(3)所有这些二长花岗质片麻岩在地球化学特征上高 SiO_2、K 和低 $Mg^{\#}$ 等以及类似球粒陨石的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-0.39 ~ +0.92)和正的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(+0.11 ~ +1.85)的同位素特征表明它们可能为更早的岩石(可能含有 TTG 质岩石或新生地壳物质)重熔作用的产物。

References

Almeida ME, Macambira MJB and Oliveira EC. 2007. Geochemistry and zircon geochronology of the I-type high-K calc-alkaline and S-type granitoid rocks from southeastern Roraima, Brazil: Orosirian collisional magmatism evidence (1.97 ~ 1.96Ga) in central portion of Guyana Shield. Precambrian Research, 155: 69 - 97

Amelin Y, Lee DC and Halliday AN. 2000. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64: 4205 - 4225

Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and evolution of the mantle-crust system. Earth Planet. Sci. Lett., 148: 243 - 258

Chen B, Liu SW, Geng YS and Liu CQ. 2006. Zircon U-Pb ages, Hf isotopes and significance of the Late Archean-Paleoproterozoic

granitoids from the Wutai-Lüliang terrain, North China. Acta Petrologica Sinica, 22(2): 296 – 304 (in Chinese with English abstract)

Diwu CR, Sun Y, Lin CL, Liu XM and Wang HL. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan Province, China. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 253 – 262 (in Chinese with English abstract)

Diwu CR, Sun Y, Yuan HL, Wang HL, Zhong XP and Liu XM. 2008. U-Pb ages and Hf isotopes for detrital zircons from quartzite in the Paleoproterozoic Songshan Group on the southwestern margin of the North China Craton. Chinese Science Bulletin, 53(18): 2828 – 2839

Drüppel K, McCready AJ and Stumpfl EF. 2009. High-K granites of the Rum Jungle Complex, N-Australia: Insights into the Late Archean crustal evolution of the North Australian Craton. Lithos, 111: 203 – 219

Frost BR, Barnes CG, Collins WJ, Arculus RJ, Ellis DJ and Frost CD. 2001. A geochemical classification of granitic rocks. Journal of Petrology, 42: 2033 – 2048

Frost CD, Frost BR, Chamberlain KR and Hulsebosch TP. 1998. The Late Archean history of the Wyoming province as recorded by granitic magmatism in the Wind River Range, Wyoming. Precambrian Research, 89: 145 – 173

Gao L and Gao F. 1988. Rb-Sr isochron age of granulite in Zhangjiakou-Xuanhua area, Hebei Province. Bulletin of the Tianjin Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 121 – 127 (in Chinese)

Geng YS, Yang CH and Wan YS. 2006. The evolution of Paleoproterozoic granites in Lüliang area, North China Craton: Constraint from isotopic geochronology. Acta Petrologica Sinica, 22(2): 305 – 314 (in Chinese with English abstract)

Geng YS, Shen QH and Ren LD. 2010. Late Neoarchean to Early Paleoproterozoic magmatic events and tectonothermal systems in the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 26(7): 1945 – 1966 (in Chinese with English abstract)

Grant ML, Wilde SA, Wu FW and Yang JH. 2009. The application of zircon cathodoluminescence imaging, Th-U-Pb chemistry and U-Pb ages in interpreting discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic boundary. Chemical Geology, 261: 155 – 171

Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in Kimberlites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64: 133 – 147

Guo JH, Zhai MG, Li YG, Yan YH and Zhang WH. 1994. Isotopic ages and their tectonic significance for metamorphic rocks from the middle part of the Early Precambrian granulite belt, North China craton. In: Qian XL and Wang RM (eds.). Geological Evolution of the Granulite Terrain in the North Part of the North China Craton. Beijing: Seismological Press, 130 – 144 (in Chinese with English abstract)

Guo JH, Zhai MG, Li JH and Li YG. 1996. Nature of the Early Precambrian Sanggan structure zone in North China Craton: Evidence from rock association. Acta Petrologica Sinica, 12(2): 193 – 207 (in Chinese with English abstract)

Guo JH, Sun M, Chen FK and Zhai MG. 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic continental collision. Journal of Asian Earth Sciences, 24: 629 – 642

Jiang N, Guo JH, Zhai MG and Zhang SQ. 2010. ~2.7Ga crust growth in the North China Craton. Precambrian Research, 179: 37 – 49

Kampunzu AB, Tombale AR, Zhai M, Bagai Z, Majaule T and Modisi MP. 2003. Major and trace element geochemistry of plutonic rocks from Francistown, NE Botswana: Evidence for a Neoarchaean continental active margin in the Zimbabwe Craton. Lithos, 71: 431 – 460

Kleinhanns IC, Kramers JD and Kamber BS. 2003. Importance of water for Archaean granitoid petrology: A comparative study of TTG and potassic granitoids from Barberton Mountain Land, South Africa. Contribution to Mineralogy and Petrology, 145: 377 – 389

Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005. Age and evolution of a Late Archean to Early Palaeoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. Journal of Asian Earth Sciences, 24: 577 – 596

Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 22: 23 – 40

Kusky TM. 2011. Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton. Gondwana Research, 20: 26 – 35

Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre Le Bas MJ, Sabine PA, Schmid H, Streckeisen A, Woolley AR and Zanettin B. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Oxford: Blackwell, 1 – 193

Li XH, Li ZX and Zhou XH. 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia. Precambrian Research, 113: 135 – 154

Liu DY, Geng YS and Song B. 1997. Late Archean crustal accretion and reworking in northwestern Hebei Province: Isochronological evidence. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 226 – 232 (in Chinese with English abstract)

Liu DY, Jian P, Zhang Q *et al*. 2003. Shrimp dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for Early Paleozoic subduction. Acta Geol. Sin., 77: 317 – 327 (in Chinese with English abstract)

Liu F, Guo J H, Lu X P and Diwu CR. 2009. Crustal growth at ~2.5Ga in the North China Craton: Evidence from whole-rock Nd and zircon Hf isotopes in the Huai'an gneiss terrane. Chinese Sci. Bull., 54(24): 4704 – 4713

Liu SW, Lü YJ, Feng YG, Liu XM, Yan QR, Zhang C and Tian W. 2007a. Zircon and monazite geochronology of the Hongqiyingzi complex, northern Hebei, China. Geological Bulletin of China, 26(9): 1086 – 1100 (in Chinese with English abstract)

Liu SW, Lü YJ, Feng YG, Zhang C, Tian W, Yan QR and Liu XM. 2007b. Geology and zircon U-Pb isotopic chronology of Dantazi complex, northern Hebei Province. Geological Journal of China Universities, 13(3): 484 – 497 (in Chinese with English abstract)

Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements using ICP-MS. Geochimica, 25: 552 – 558 (in Chinese with English abstract)

Lopez S, Castro A and Garcia-Casco A. 2005. Production of granodiorite melt by interaction between hydrous mafic magma and tonalitic crust: Experimental constraints and implications for the generation of Archaean TTG complexes. Lithos, 79: 229 – 250

Lopez S, Fernandez C and Castro A. 2006. Evolution of the Archean continental crust: Insights from the experimental study of Archean granitoids. Current Science, 91: 607 – 621

Martin H and Moyen JF. 2005. The Archean-Proterozoic transition: Sanukitoid and Closepet-type magmatism. Mineralogical Society of Poland, Special Papers, 26: 57 – 67

Moyen JF, Martin H, Jayananda M and Auvray B. 2003. Late Archean granites: A typology based on the Dharwar Craton (India). Precambrian Research, 127: 103 – 123

Nutman AP, Wan YS, Du LL, Friend CRL, Dong CY, Xie HQ, Wang W, Sun HY and Liu DY. 2011. Multistage Late Neoarchaean crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei. Precambrian Research, 189: 43 – 65

Shang CK, Satir M, Nsifa EN, Liégeois JP, Siebel W and Taubald H. 2007. Archaean high-K granitoids produced by remelting of the earlier tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) in the Sangmelima region of the Ntem complex of the Congo Craton, southern Cameroon. International Journal of Earth Sciences, 96: 817 – 842

Shang CK, Liégeois JP, Satir M, Frisch W and Nsifa EN. 2010. Late Archaean high-K granite geochronology of the northern metacratonic margin of the Archaean Congo craton, Southern Cameroon: Evidence for Pb-loss due to non-metamorphic causes. Gondwana Research, 18: 337 – 355

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Ocean Basins. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313 – 345

Vervoort JD, Pachett PJ, Gehrels GE and Nutman AP. 1996. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes. Nature, 379: 624 – 627

Wan YS, Zhang QD and Song TR. 2003. SHRIMP ages of detrital zircons from the Changcheng System in the Ming Tombs area, Beijing: Constraints on the protolith nature and maximum depositional age of the Mesoproterozoic cover of the North China Craton. Chinese Science Bulletin, 48(22): 2500 – 2506

Wan YS, Dong CY, Liu DY, Kröner A, Yang CH, Wang W, Du LL, Xie HQ and Ma MZ. 2011. Zircon ages and geochemistry of Late Neoarchean syenogranites in the North China Craton: A review. Precambrian Research, doi:10.1016/j.precamres.2011.05.001

Wang RM and Dong WD. 1999. A new consideration about geotectonic setting of high-pressure granulite belt in northwestern Hebei Province. Earth Science Frontiers, 6(4): 347 – 351 (in Chinese with English abstract)

Wilde SA, Cawood P, Wang KY and Nemchin A. 1997. The relationship and timing of granitoid evolution with respect to felsic volcanism in the Wutai Complex, North China Craton. Proceedings of the 30th International Geological Congress, Beijing. Precambrian Geol. Metamorph. Petrol., 17: 75 – 88

Xie LW, Zhang YB, Zhang HH, Sun JF and Wu FY. 2008. In situ simultaneous determination of trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes in zircon and baddeleyite. Chinese Science Bulletin, 53(10): 1565 – 1573

Xu P, Wu FY, Xie LW and Yang YH. 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. Chinese Sci. Bull., 49: 1642 – 1648

Yang JH, Wu FY, Wilde SA and Zhao GC. 2008. Petrogenesis and geodynamics of Late Archean magmatism in eastern Hebei, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Hf isotopic evidence. Precambrian Research, 167: 125 – 149

Zhai MG, Guo JH, Yan YH, Li YG and Zhang WH. 1992. Discovery and preliminary study of Archaean high-pressure basic granulites in North China. Science in China (Series B), 36:1402 – 1408

Zhai MG, Guo JH and Li YG. 1994. Rocks units of the archean granulite terrain in joining region of Shanxi-Hebei-Inner Mongolia of north China: Their properties, mutual relations and evolution. In: Qian XL and Wang RM (eds.). Geological Evolution of the Granulite Terrain in North Part of the North China Craton. Beijing: Seismological Press, 21 – 31 (in Chinese with English abstract)

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(1): 219 – 232

Zhai MG, Guo JH and Zhao TP. 2001. Study advances of Neoarchaean-Palaeoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. Prog. Precambrian Res., 84 (3): 17 – 27 (in Chinese with English abstract)

Zhai MG and Liu WJ. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China Craton: A review. Precambrian Research, 122: 183 – 199

Zhai MG, Guo JH and Liu WJ. 2005. Neoarchean to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: A review. Journal of Asian Earth Sciences, 24: 547 – 561

Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of North China Craton: A synoptic overview. Gondwana Research, 20: 6 – 25

Zhang HF, Zhai MG, Santosh M, Diwu CR and Li SR. 2011. Geochronology and petrogenesis of Neoarchean potassic meta-granites from Huai'an Complex: Implications for the evolution of the North China Craton. Gondwana Research, 20: 82 – 105

Zhang Q. 2011. The central belt of the North China Craton during Paleoproterozoic is an orogenic belt? Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1029 – 1036 (in Chinese with English abstract)

Zhang ZQ, Shen QH, Geng YS, Tang SH and Wang JH. 1996. Geochemistry and ages of Archean metamorphic rocks in northwestern Hebei Province, China, and formation time of the Paleocrust in the region. Acta Petrologica Sinica, 12(2): 315 – 328 (in Chinese with English abstract)

Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA, Sun M 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 P A and Sun M. 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: 45 – 73

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 and Wilde SA. 2002. Major tectonic units of the North China Craton and their Paleoproterozoic assembly. Sci. China (Series D), 32(7): 538 – 549 (in Chinese)

Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li S. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Res., 136: 177 – 202

Zhao GC, Liu SW, Sun M, Li SZ, Wilde SA, Xia X, Zhang J and He Y. 2006. What happened in the Trans-North China Orogen in the period 2560 ~ 850Ma? Acta Geologica Sinica, 80(6): 790 – 806

Zhao GC, Wilde SA, Sun M, Guo JH, Kröner 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

Zhao GC. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. Acta Petrologica Sinica, 25(8): 1772 – 1792 (in Chinese with English abstract)

Zheng JP, Lu FX, Yu CM and Tang HY. 2004. An in situ zircon Hf isotope, U-Pb age and trace element study of banded granulite xenoliths from Hannuoba basalt: Tracking the early evolution of the lower crust in the North China Craton. Chinese Science Bulletin, 49(3): 277 – 285

Zhou YY, Zhao TP, Wang CY and Hu GH. 2011. Geochronology and geochemistry of 2.5 to 2.4Ga granitic plutons from the southern margin of the North China Craton: Implications for a tectonic transition from arc to post-collisional setting. Gondwana Research, 20: 171 – 183

Zhou YY, Zhao TP, Xue LW, Wang SY and Gao JF. 2009. Petrological, geochemical and chronological constraints for the origin and geological significance of Neoarchean TTG gneiss in the Songshan area, North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 25(2): 331 – 347 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈斌，刘树文，耿元生，刘超群. 2006. 吕梁-五台地区晚太古宙-古元古代花岗质岩石锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义. 岩石学报，22(2)：296 – 304

第五春荣，孙勇，林慈銮，柳小明，王洪亮. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学岩石学报，23(2)：253 – 262

高励，高凡. 1988. 河北张家口-宣化地区麻粒岩 Rb-Sr 等时线年龄的研究. 中国地质科学院天津地质研究所所刊，121 – 127

郭敬辉，翟明国，李永刚，阎月华，张雯华. 1994. 冀内蒙交界地区早前寒武纪变质杂岩同位素年代及其构造意义. 见：钱祥麟，王

仁民编. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 130 – 144

郭敬辉, 翟明国, 李江海, 李永刚. 1996. 华北克拉通早前寒武纪桑干构造带的岩石组合特征和构造性质. 岩石学报, 12(1): 193 – 207

耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 2006. 吕梁地区古元古代花岗岩的演化——来自同位素年代学的证据. 岩石学报, 22(2): 305 – 314

耿元生, 沈其韩, 任留东. 2010. 华北克拉通晚太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制. 岩石学报, 26(7): 1945 – 1966

刘敦一, 耿元生, 宋彪. 1997. 冀西北地区晚太古代大陆地壳的增生和再造——同位素年代学证据. 地球学报, 18(3): 226 – 232

刘敦一, 简平, 张旗等. 2003. 内蒙古土岭开蛇绿岩中埃达克岩的 SHRIMP 年龄: 早古生代俯冲证据. 地质学报, 77: 317 – 327

刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 柳小明, 闫全人, 张臣, 田伟. 2007a. 冀北红旗营子杂岩的锆石、独居石年代学及地质意义. 地质通报, 26(9): 1086 – 1100

刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 张臣, 田伟, 闫全人, 柳小明. 2007b. 冀北单塔子杂岩的地质学和锆石 U-Pb 年代学. 高校地质学报, 13(3): 484 – 497

刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25: 552 – 558

王仁民, 董卫东. 1999. 冀西北高压麻粒岩带构造环境的再思考. 地学前缘, 6(4): 347 – 351

翟明国, 郭敬辉, 李永刚. 1994. 晋冀蒙交界地区高压基性麻粒岩带及其相邻岩石组合的性质. 见: 钱祥麟, 王仁民编. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京: 地震出版社, 21 – 31

翟明国, 郭敬辉, 赵太平. 2001. 新太古-古元古代华北陆块构造演化的研究进展. 前寒武纪研究进展, 84(3): 17 – 27

张旗. 2011. 华北克拉通中部在古元古代时是一个造山带么? 岩石学报, 27(4): 1029 – 1036

张宗清, 沈其韩, 庚元生, 唐索寒, 王进辉. 1996. 赤城伙房村和崇礼上新营变质岩的地球化学特征、年龄及其地壳形成时间. 岩石学报, 12(2): 315 – 328

赵国春, 孙敏, Wilde SA. 2002. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合. 中国科学(D 辑), 32(7): 538 – 549

赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. 岩石学报, 25(8): 1772 – 1792

周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 王世炎, 高剑峰. 2009. 河南嵩山地区新太古代 TTG 质片麻岩的成因及其地质意义: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约. 岩石学报, 25(2): 331 – 347