

内蒙古苏尼特左旗中元古代片麻状花岗岩的成因及大地构造意义

孙立新, 任邦方, 王树庆, 许新英, 张云

中国地质调查局天津地质调查中心, 天津, 300170

内容提要:内蒙古锡林浩特地块位于兴蒙造山带中部, 地块前寒武纪岩系由宝音图群和片麻状花岗岩等组成。锡林浩特地块~1.4Ga 片麻状花岗质岩石的发现为古老地块提供了佐证, 但其岩石成因及大地构造意义不清。苏尼特左旗地区中元古代花岗岩主要由片麻状正长花岗岩和片麻状二长花岗岩组成。4 件样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 1373~1399Ma, 属中元古代中期。片麻状花岗岩具有高硅、富碱、 K_2O/Na_2O 比值 >1 和过铝质等特征, 并且稀土总量高、Eu 负异常明显、轻稀土富集且重稀土亏损, 属于 A_2 -型花岗岩。总体具有弱亏损的同位素组成, 全岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 除一个样品为负值(-0.2)以外, 均为较小正值(+0.3~+1.0), 两阶段 Nd 模式年龄 t_{DM2} 为 1.88~1.97Ga, 锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值均为正值(+0.8~+11.1), t_{DM2} 大多介于 1.45~2.17Ga 之间, 表明主要源于古元古代末期新生地壳的部分熔融。区域上~1.4Ga 钾质花岗岩类的广泛出现表明为一次陆壳伸展作用引发构造岩浆事件, 它是对全球哥伦比亚超大陆裂解事件的响应, 锡林浩特地块中元古代(~1.4Ga) A-型花岗岩的发现表明中元古代中期华北克拉通和锡林浩特地块同处于大陆伸展的构造环境。

关键词: 中元古代; A 型花岗岩; 伸展事件; 苏尼特左旗

中亚造山带位于东欧板块、西伯利亚板块、塔里木-华北板块之间, 是古亚洲洋及其中众多微大陆长期演化的结果(Sengör et al., 1993), 同时也是世界上显生宙地壳生长最为显著的地区(Sengör et al., 1993; Hong Dawei et al., 1998, 2003; Wu Fuyuan et al., 1999; Jahn et al., 2000, 2004; Badarch et al., 2002; Xiao et al., 2003)。兴蒙造山带位于中亚造山带东南缘, 南与华北板块相连, 北邻西伯利亚板块(图 1), 研究表明造山带中分布着众多由前寒武纪变质岩系组成的古老块体(Shao Ji'an et al., 1990; Shao Ji'an, 1991; Gordienkoe, 1996; Li Shujing et al., 1998; Ren Jishun et al., 1999; Liu Zhenhong, 2000; Kozmichev, 2001; Khain et al., 2002, 2003; Pisarevsky and Natapov, 2003; Li Jinyi, 2006; Rojas-Agramonte, 2011; Xu Bei et al., 2014)。由于后期造山作用的强烈改造, 目前对这些微地块的前寒武纪地壳形成和演化仍缺少足够的认识。

锡林浩特地块为二连贺根山缝合带和索伦山-西拉木伦缝合带之间的狭长地块, 它是兴蒙造山带中微陆块之一(图 1), 总体呈东西向展布, 东西延伸

达 500km, 向西与蒙古国托托尚地块相连, 锡林浩特地块又被称为艾勒格庙-锡林浩特中间地块(Cheng Yuqi, 1994)。

苏尼特左旗地区位于锡林浩特地块西部, 该地区出露的前寒武纪地层前人统称“宝音图群”(Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia, 1991)。宝音图群为主要经历绿片岩相—角闪岩相变质作用的中级变质岩系, 其主要岩石类型有石英岩、云母石英片岩、大理岩、黑云斜长片麻岩、长英质片麻岩等构成的表壳岩系。除宝音图群外, 还发育温都尔庙群。温都尔庙群为经历蓝片岩相—绿片岩相变质的中浅变质岩系(Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia, 1996), 主要岩石类型有绢云石英片岩、绿泥石英片岩、蓝片岩、石英岩、含铁石英岩、变玄武岩、辉长、辉绿岩等, 其原岩基本上以变质陆源碎屑-火山岩建造为主, 呈近东西向带状展布, 形成时代为早古生代早期(Xu Bei et al., 2016)。宝音图群作为锡林浩特地块的基底, 其原岩形成时代为古元古代, 其角闪岩相变质作用发生在早古生代

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 41572172)和中国地质调查局地质调查项目(编号 1212011121078)联合资助的成果。

收稿日期: 2018-01-24; 改回日期: 2018-06-05; 责任编辑: 周健。

作者简介: 孙立新, 男, 1964 年生。博士, 研究员, 主要从事前寒武纪地质和区域地质调查研究工作。Email: tjslixin@126.com。

(Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia, 1991; Li Shujing et al., 1995; Xiao Rongge et al., 1995; Liu Dunyi et al., 2003)。盖层发育晚古生代石炭纪—二叠纪火山—沉积岩系和中新生代地层。该地区岩浆活动频繁,发育大量的花岗质岩石和火山岩。野外观察发现,其中一部分以片麻状花岗质岩石为主,经受区域变质作用的改造,具有与宝音图群近于一致的片麻理构造,此类岩石变形、变质均较强烈,为地块结晶基底的组成之一。另一部分以未变质变形的花岗岩、中酸性火山岩为主,多为晚古生代—中生代的侵入体。近年来我们在苏尼特左旗地区片麻状花岗岩锆石 U-Pb 测年中获得了中元古代年龄($1.39 \sim 1.41\text{Ga}$),反映锡林浩特地块存在中元古代岩浆记录(Sun Lixin et al., 2013)。

~1.4 Ga 岩浆活动在全球范围分布十分广泛,在欧洲芬诺斯坎迪亚(Fennoscandia)地区、北美洲大陆,包括加拿大以及美国的西南部等地区有一个广泛的以长英质为主的中元古代($1.3 \sim 1.5\text{Ga}$)岩浆活动带,或称之为~1.4 Ga 的岩浆活动带,它沿着劳伦古陆(Laurentia)太古宙克拉通的外侧边缘地带分布(Nyman et al., 1994)。~1.4 Ga 岩浆事件在中亚造山带中多个微陆块及周缘克拉通发育,如哈萨克斯坦板块(Konopelko et al., 2012)、中天山地块(Hu Aiqin et al., 2006; Shi Wenxiang et al., 2010; He Zhenyu et al., 2015; He et al., 2015)、锡林浩特地块(Sun Lixin et al., 2013);在中亚造山带周缘克拉通中,东欧板块也发育该时期构造岩浆记录,如 Sveco-Fennian, Trans-Scandinavian 和 Gothian 等构造带(Cawood et al., 2007; Kuznetsov et al., 2010);华北板块及其北缘同样具有该时期构造热事件的记录(Li Huaikun et al., 2009; Zhang Shuanhong et al., 2012; Su Wenbo et al., 2014)。因此,~1.4Ga 构造岩浆记录对揭示造山带微地块的来源及其形成的构造环境具有重要的意义。锡林浩特地块虽然已经发现中元古代(~1.4Ga)的花岗质片麻岩和片麻状正长花岗岩,但是这些花岗质岩石的成因、来源及构造环境尚未做深入研究。为此,本文选择新发现的中元古代片麻状花岗岩类为研究对象,进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、岩石学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究,并结合兴蒙造山带及华北板块前寒武纪研究资料,探讨其岩石成因及大地构造意义。

1 岩体地质及岩石学特征

苏尼特左旗中元古代片麻状花岗岩分布于花推绕木至哈朱车根庙一带(图 1),该处前寒武纪变质岩系出露面积约 8.3km^2 ,周围被显生宙花岗岩侵入。中元古代片麻状花岗岩由浅肉红色弱片麻状中细粒正长花岗岩、混合花岗质片麻岩以及弱条带状片麻状中细粒二长花岗岩等组成。野外观察到片麻状正长花岗岩中见有黑云斜长片麻岩的捕虏体,捕虏体直径大小为 $10 \sim 35\text{cm}$ (图 2A),片麻状正长花岗岩脉侵入片麻状二长花岗岩中(图 2B)。条带或片麻状正长花岗岩具有弱的混合岩化,普遍发育条带状片麻理构造(图 2C),由长英质浅色条带与黑云母组成的暗色条带相间排列构成,长英质条带宽 $0.3 \sim 0.5\text{cm}$,长 $10 \sim 30\text{cm}$,边界模糊不清;暗色条带宽 $0.5 \sim 1.5\text{cm}$,长约 $30 \sim 50\text{cm}$,具有变质分异条带特点。片麻状中细粒二长花岗岩岩石相对均匀(图 2D),局部发育弱的片麻状构造,不具有变质分异条带特征,岩石成分单一,主要为长英质成分,少量黑云母。

(1)正长花岗岩:新鲜面为肉红色,中粒—中粗粒半自形粒状结构(图 2E、F),局部可见似斑状结构,条纹状—弱片麻状构造。主要矿物为石英($25\% \sim 30\%$)、钾长石(微斜长石)($30\% \sim 40\%$)、条纹长石($15\% \sim 20\%$)、斜长石 $5\% \sim 10\%$,以及少量黑云母(约 5%)。长石类矿物多为半自形板状,粒径 $2 \sim 3\text{mm}$,其中,微斜长石具有格子双晶特征,微斜长石内部多发生了轻微的绢云母化蚀变。条纹长石具细条带状、叶脉状条纹结构。斜长石为半自形板状,发育聚片双晶和卡钠复合双晶结构,粒径多为 $1 \sim 2\text{mm}$ 。石英多为他形粒状。黑云母为半自形片状,呈集合体。副矿物可见磷灰石、锆石、榍石等。

(2)黑云二长花岗片麻岩:岩石新鲜面为浅肉红色,具鳞片状中粒状变晶结构,块状—片麻理构造发育。岩石由钾长石($35\% \sim 40\% \pm$)、斜长石($30\% \sim 35\%$)、石英($25\% \sim 30\% \pm$)、黑云母($5\% \sim 10\%$)组成。斜长石呈他形粒状,具土化、绢云母化,粒径 $0.2 \sim 1.1\text{mm}$ 。石英呈他形粒状,粒内具波状消光和亚颗粒,粒径多 $0.15 \sim 0.95\text{mm}$ 。钾长石为微斜长石,具格子双晶,具土化,粒径 $0.2 \sim 1.8\text{mm}$ 。黑云母呈暗褐色片状,具定向排列,片长 $0.1 \sim 2\text{mm}$ (图 2D)。副矿物可见磷灰石、榍石、钛铁矿和锆石。

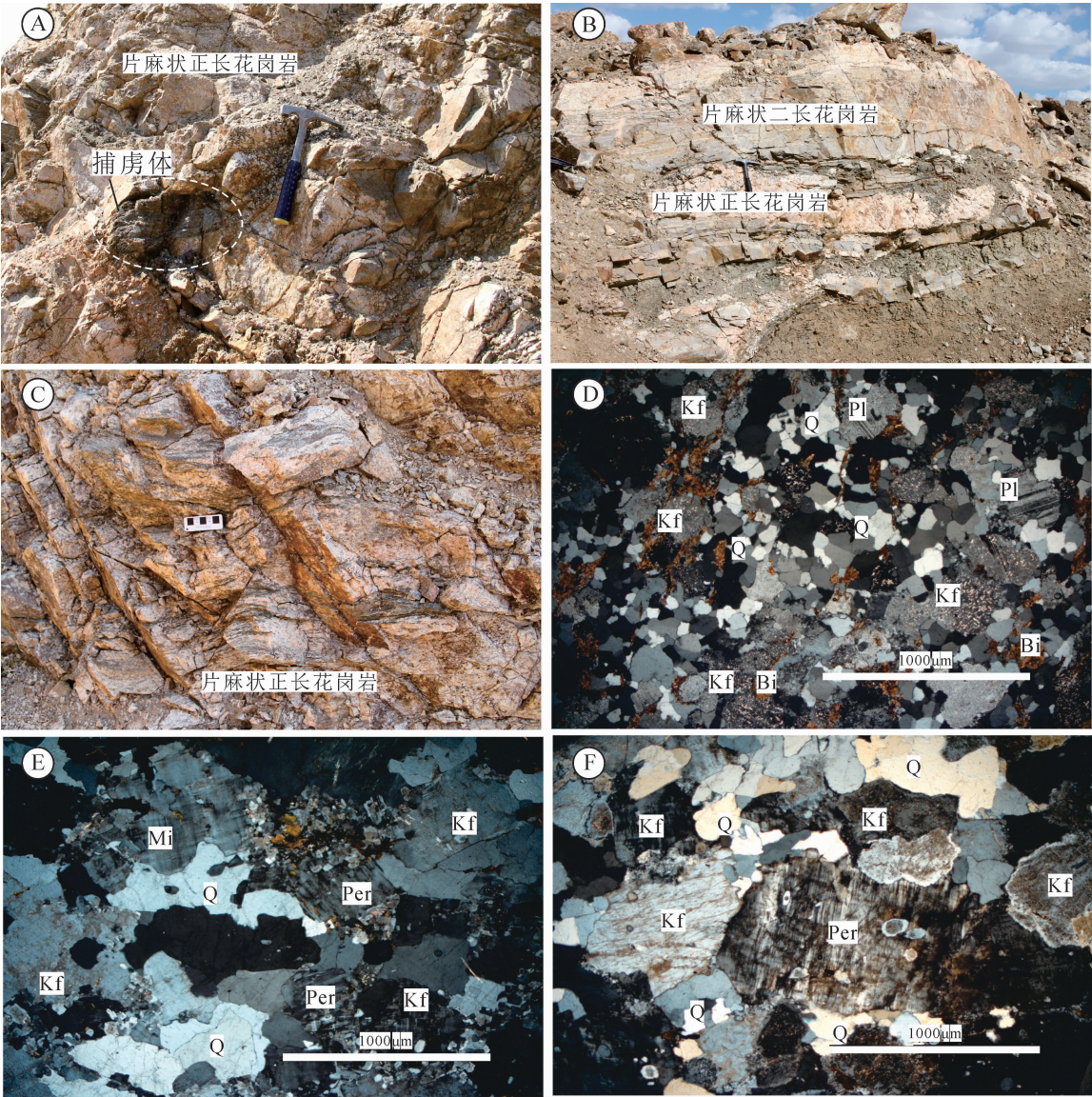


图 2 苏尼特左旗片麻状花岗岩野外(A~C)和显微照片(D~F 正交偏光镜下)
Fig. 2 Photographs of the outcrops (A~C) and photomicrographs (D~F) of the samples from gneissic granitoids in the Sonid Left Banner area

A—正长花岗岩中见有黑云斜长片麻岩的捕虏体;B—正长花岗岩脉侵入片麻状二长花岗岩;C—正长花岗岩不均一条带片麻状构造;
D—片麻状二长花岗岩显微照片;E—正长花岗岩显微照片;F—片麻状正长花岗岩中的条纹长石;
Q—石英;Bi—黑云母;Kf—钾长石;Mi—微斜长石;Per—条纹长石;Pl—斜长石
A—Syenogranite saw in the gneiss xenoliths; B—syenogranite invasive pulse gneissic adamellite;
C—band an unevenness syenogranite gneissic structure; D—gneissic adamellite micrograph; E—syenogranite micrograph;
F—gneissoid perthite in syenogranite; Q—quartz; Bi—biotite; Kf—potassic feldspar; Mi—microcline; Per—perthite; Pl—plagioclase

2 样品及分析方法

2.1 锆石 U-Pb 测年

苏尼特左旗片麻状花岗岩样品锆石挑选由河北省区域地质调查研究所实验室采用常规方法选取完成,制靶、锆石透射、反射、阴极发光照相在天津地质矿产研究所同位素实验室完成,锆石 U-Pb 年龄以及 Lu-Hf 同位素分析在 LA-MC-ICP-MS 仪器上完

成。利用 193 nm 激光器对锆石进行剥蚀,采用激光剥蚀的束斑直径为 35 μm,进行锆石 U-Pb 同位素测定,采用 TEMORA 作为外部锆石年龄标准。利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量,详细的实验原理和流程参见文献 (Liu Y S et al., 2010)。采用 ICP-MS DataCal 程序和 Isoplot (ver3.0) 程序 (Ludwig, 2003) 进行数据处理。

2.2 主量、微量元素

本文分析样品均采自苏尼特左旗(图 2),野外采集新鲜的岩石,通过室内显微镜下观察后,挑选出新鲜的片麻状花岗岩样品,测试分析在天津地质矿产研究所测试完成,主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测试,Fe₂O₃、FeO 应用氢氟酸硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法测定,分析精度优于 2%,微量元素使用等离子体质谱仪(MC-ICP)测试,分析精度优于 5%。

2.3 全岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析

在天津地质矿产研究所同位素实验室 TRITON 热电离质谱仪上完成。设备型号 08-100016sb,检测环境温度 18℃,湿度 20%。含量测定和同位素比值测定均由 TRITON 热电离质谱仪上进行,用平行双灯丝构件的离子源测 Sm、Nd、Sr 的质谱标准样 NBS-987 给出的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.710 253±6。J. M. C-Nd 质谱标准样的结果¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 为 0.511132±5,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 用⁸⁸Sr/⁸⁶Sr(8.37521)、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd(0.7219)标准化。

2.4 锆石 Hf 同位素分析

锆石 Lu-Hf 同位素测试在天津地质矿产研究所实验室完成,采用配有 193nm 的 LA-MC-ICP-MS 仪器上进行,分析时采用 8~10Hz 的激光频率、100mJ 的激光强度和 50μm 的激光束斑直径。激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune,采用 GJ-1 作为监控标样,具体测试过程见 Geng Jianzhen et al. (2011)。为使 Hf 同位素分析与锆石 U-Pb 年龄分析相对应,我们的锆石 Hf 同位素的分析点与锆石 U-Pb 年龄分析点位于同一颗粒相同锆石晶域内。可以认为所分析点的 Hf 同位素和 U-Pb 年龄是完全对应的。所以在计算 Hf 同位素的相关参数时,采用的是同一颗粒锆石所测得的 U-Pb 年龄。在计算¹⁷⁶Lu 的衰变常数采用 1.865×10⁻¹¹/a (Scherer et al., 2001)。球粒陨石的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 和¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 的比值分别为 0.0332 和 0.282772 (Blichert-Toft and Albarede, 1997),亏损地幔的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 和¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 的比值分别为 0.0384 和 0.28325 (Griffin et al., 2000),二阶段模式年龄分别采用平均地壳的 Lu/Hf = -0.55, (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{平均地壳} 为 0.015 (Griffin et al., 2002)。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

本文对苏尼特左旗片麻状花岗岩中的 4 件样品

进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,样品号及地理坐标(图 1)分别是 12TW1-2(N43°40′03.19″,E113°59′42.92″);12TW2-5(N43°40′29.49″,E113°58′54.49″);12TW3(N43°38′17.12″,E113°58′36.89″);12TW4(N43°40′30.56″,E113°57′41.96″),4 件样品测年分析结果见表 1。

四件测年样品中的 3 件片麻状花岗岩样品(12TW1-2,12TW3,12TW4)的锆石特征基本一致,锆石多为无色、淡黄或淡橘黄色的透明至半透明的短柱状、长柱状晶体,粒度多在 150~300μm 之间,晶面光滑,晶棱平直,长宽比 2:1。锆石的 Th/U 为 0.20~1.14,绝大多数大于 0.4。阴极发光图像显示出振荡环带和韵律结构(图 3)的岩浆锆石特征。样品 12TW2-5 岩性为片麻状黑云二长花岗岩,样品中的锆石为无色、淡黄色的透明至半透明的长柱状晶体,晶型完好,呈自形柱状、长柱状,晶面平直。粒度多在 150~250μm,柱状晶体长宽比为 2:1。阴极发光图像显示锆石具有清晰的核边结构,(图 3),锆石核部具有典型的岩浆成因锆石生长环带和韵律结构,锆石边部具有较宽的黑色变质增生边,部分锆石核边具有溶蚀港湾结构,可能为后期构造热事件改造的结果。锆石核部 Th/U 为 0.32~1.11,普遍大于 0.4,为岩浆锆石成因,锆石边部 Th/U 为 0.02~0.19,普遍小于 0.2,为变质增生边。

12TW1-2 样品测得锆石 25 个点的分析结果(表 1),其中 25 颗锆石的 25 个测点微区记录的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄相似,变化于 1346~1393Ma 之间,多数分析点在谐和图上,少数偏离谐和曲线,铅丢失较为严重,但基本可以构成一条不一致线,该不一致与谐和曲线上交点年龄为 1373±7Ma(图 3),代表片麻状二长花岗岩形成的年龄。12TW3 样品测试了 32 个点,其中有效的 27 颗岩浆锆石测年结果(表 1),26 颗锆石微区记录的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄集中变化于 1317~1415Ma 之间,多数分析点在谐和线上,该样品的上交点年龄为 1392±16Ma(图 3)。12TW4 样品的 26 颗岩浆锆石测年结果(表 1),锆石微区记录的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄十分一致,皆位于谐和线上或谐和线附近,集中变化于 1377~1414Ma 之间,去除谐和度不理想的 4 个点,该样品的上交点年龄年龄为 1399±11Ma(图 3),可代表片麻状正长花岗岩的形成时代。

12TW2-5 片麻状黑云二长花岗岩样品的 24 颗锆石进行了 48 个点的核部和边部测年(表 1),其中

表 1 苏尼特左旗片麻状花岗岩 LA- ICP-MS 锆石 U-Pb 测年数据

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating data of gneissic granite in the Sonid Left Banner area, Inner Mongolia

测点	同位素比值						年龄 (Ma)						(×10 ⁻⁶)		Th/U
	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	Th	U	
12TW1-2 片麻状二长花岗岩															
1	0.2333	0.0020	2.7782	0.0258	0.0864	0.0006	1352	12	1350	13	1346	13	578	602	0.96
2	0.2287	0.0019	2.7373	0.0241	0.0868	0.0006	1327	11	1339	12	1357	13	834	818	1.02
3	0.2349	0.0020	2.8210	0.0253	0.0871	0.0006	1360	11	1361	12	1363	12	388	468	0.83
4	0.2341	0.0020	2.8256	0.0249	0.0875	0.0006	1356	11	1362	12	1372	12	404	444	0.91
5	0.2335	0.0020	2.8102	0.0250	0.0873	0.0006	1353	11	1358	12	1367	13	394	414	0.95
6	0.2329	0.0020	2.8055	0.0248	0.0874	0.0006	1350	11	1357	12	1369	13	330	413	0.80
7	0.2228	0.0020	2.6683	0.0259	0.0868	0.0006	1297	12	1320	13	1357	13	477	532	0.90
8	0.2401	0.0021	2.8715	0.0267	0.0868	0.0006	1387	12	1374	13	1355	13	461	456	1.01
9	0.2305	0.0020	2.7937	0.0259	0.0879	0.0006	1337	11	1354	13	1380	13	305	390	0.78
10	0.2326	0.0020	2.8204	0.0261	0.0879	0.0006	1348	12	1361	13	1381	13	271	311	0.87
11	0.2217	0.0019	2.6811	0.0241	0.0877	0.0006	1291	11	1323	12	1376	13	296	380	0.78
12	0.2330	0.0020	2.8304	0.0262	0.0881	0.0006	1350	12	1364	13	1385	12	478	492	0.97
13	0.2230	0.0019	2.7070	0.0253	0.0880	0.0006	1298	11	1330	12	1383	13	354	378	0.94
14	0.2206	0.0025	2.6628	0.0336	0.0876	0.0006	1285	15	1318	17	1373	13	177	299	0.59
15	0.2322	0.0020	2.8139	0.0260	0.0879	0.0006	1346	12	1359	13	1380	13	412	494	0.83
16	0.2139	0.0020	2.5807	0.0260	0.0875	0.0006	1250	12	1295	13	1372	13	451	637	0.71
17	0.2367	0.0020	2.8614	0.0269	0.0877	0.0006	1369	12	1372	13	1376	13	397	433	0.92
18	0.2351	0.0020	2.8589	0.0272	0.0882	0.0006	1361	12	1371	13	1387	13	332	474	0.70
19	0.2281	0.0019	2.7830	0.0252	0.0885	0.0006	1324	11	1351	12	1393	13	30	476	0.06
20	0.2343	0.0020	2.8513	0.0263	0.0883	0.0006	1357	12	1369	13	1388	13	291	391	0.74
21	0.2356	0.0022	2.8493	0.0273	0.0877	0.0006	1364	12	1369	13	1376	13	379	487	0.78
22	0.2441	0.0021	2.9655	0.0267	0.0881	0.0006	1408	12	1399	13	1385	12	541	569	0.95
23	0.2404	0.0020	2.9136	0.0274	0.0879	0.0006	1389	12	1385	13	1380	13	199	334	0.60
24	0.2434	0.0021	2.9157	0.0275	0.0869	0.0006	1404	12	1386	13	1358	13	187	277	0.68
25	0.2419	0.0020	2.9114	0.0266	0.0873	0.0006	1396	12	1385	13	1367	13	478	568	0.84
12TW2-5 片麻状二长花岗岩															
1	0.2157	0.0021	2.6183	0.0428	0.0880	0.0014	1259	12	1306	21	1383	29	94	198	0.47
2	0.2368	0.0025	2.9012	0.0357	0.0888	0.0010	1370	14	1382	17	1401	22	161	380	0.42
3	0.2461	0.0024	2.9955	0.0348	0.0883	0.0010	1418	14	1406	16	1389	22	244	573	0.43
4	0.1050	0.0011	1.1841	0.0203	0.0818	0.0013	644	7	793	14	1241	32	137	1100	0.12
5	0.2246	0.0022	2.7812	0.0398	0.0898	0.0012	1306	13	1351	19	1421	25	207	353	0.59
6	0.1289	0.0018	1.5649	0.0249	0.0881	0.0010	781	11	956	15	1384	23	146	944	0.15
7	0.2348	0.0024	3.6108	0.0572	0.1115	0.0019	1360	14	1552	25	1824	31	225	337	0.67
8	0.0701	0.0007	0.5413	0.0109	0.0560	0.0012	437	4	439	9	452	46	57	1699	0.03
9	0.2502	0.0032	5.1433	0.1620	0.1491	0.0036	1440	19	1843	58	2335	41	194	346	0.56
10	0.0704	0.0007	0.5562	0.0068	0.0573	0.0007	438	4	449	5	504	26	66	1358	0.05
11	0.2384	0.0023	2.9036	0.0344	0.0883	0.0010	1379	13	1383	16	1389	22	373	554	0.67
12	0.0696	0.0007	0.5697	0.0090	0.0593	0.0009	434	4	458	7	580	32	55	1389	0.04
13	0.2363	0.0023	2.8853	0.0477	0.0886	0.0014	1367	13	1378	23	1395	31	82	180	0.46
14	0.0800	0.0008	0.6468	0.0081	0.0587	0.0007	496	5	507	6	555	26	61	1251	0.05
15	0.1239	0.0022	1.7844	0.0353	0.1044	0.0021	753	13	1040	21	1705	37	84	437	0.19
16	0.0697	0.0007	0.5692	0.0078	0.0593	0.0008	434	4	458	6	577	29	98	1553	0.06
17	0.2419	0.0025	2.9835	0.0357	0.0894	0.0010	1397	14	1403	17	1414	22	237	509	0.47
18	0.0716	0.0008	0.5596	0.0263	0.0567	0.0022	446	5	451	21	481	87	41	1343	0.03
19	0.2058	0.0023	3.6154	0.1152	0.1274	0.0041	1206	13	1553	49	2063	57	17	276	0.06
20	0.0701	0.0007	0.5798	0.0242	0.0600	0.0027	437	4	464	19	603	96	56	1269	0.04
21	0.2361	0.0024	2.8849	0.0352	0.0886	0.0011	1366	14	1378	17	1396	24	219	445	0.49
22	0.1973	0.0035	2.8574	0.0402	0.1050	0.0028	1161	21	1371	19	1715	49	111	286	0.39
23	0.2180	0.0021	2.6804	0.0342	0.0892	0.0011	1271	12	1323	17	1408	24	164	341	0.48
24	0.2417	0.0026	2.9393	0.0349	0.0882	0.0010	1396	15	1392	17	1387	23	502	732	0.69
25	0.2075	0.0021	2.5224	0.0391	0.0881	0.0013	1216	12	1278	20	1386	29	75	233	0.32
26	0.0728	0.0007	0.5733	0.0080	0.0571	0.0008	453	4	460	6	495	32	25	1414	0.02

续表 1

测点	同位素比值						年龄 (Ma)						(×10 ⁻⁶)		Th/U
	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	Th	U	
27	0.2243	0.0027	3.4745	0.1242	0.1124	0.0036	1304	16	1521	54	1838	58	262	482	0.54
28	0.0695	0.0017	0.5725	0.0472	0.0598	0.0019	433	11	460	38	596	68	65	1668	0.04
29	0.2227	0.0023	3.0805	0.0436	0.1003	0.0013	1296	14	1428	20	1630	24	266	470	0.56
30	0.0711	0.0008	0.5723	0.0085	0.0584	0.0007	443	5	459	7	544	27	36	1531	0.02
31	0.2189	0.0021	2.8415	0.0492	0.0941	0.0016	1276	12	1367	24	1511	32	491	442	1.11
32	0.0725	0.0010	0.5793	0.0178	0.0579	0.0009	451	6	464	14	527	35	106	1695	0.06
33	0.2213	0.0021	2.7270	0.0361	0.0894	0.0011	1289	12	1336	18	1412	24	189	227	0.83
34	0.0716	0.0008	0.5707	0.0076	0.0578	0.0007	446	5	458	6	524	25	111	1818	0.06
35	0.2357	0.0024	2.9045	0.0356	0.0894	0.0010	1364	14	1383	17	1412	22	240	430	0.56
36	0.0701	0.0009	0.5501	0.0270	0.0570	0.0023	436	6	445	22	490	89	104	1769	0.06
37	0.2407	0.0025	2.9003	0.0382	0.0874	0.0010	1390	14	1382	18	1369	22	350	588	0.60
38	0.2065	0.0022	2.5247	0.0560	0.0887	0.0017	1210	13	1279	28	1397	36	293	625	0.47
39	0.2309	0.0032	2.8099	0.0387	0.0883	0.0011	1339	19	1358	19	1389	23	192	411	0.47
40	0.0713	0.0009	0.5682	0.0096	0.0578	0.0013	444	5	457	8	521	50	70	1659	0.04
41	0.2467	0.0026	3.0434	0.0452	0.0895	0.0013	1421	15	1419	21	1414	29	132	301	0.44
42	0.2461	0.0026	3.0225	0.0633	0.0891	0.0018	1418	15	1413	30	1406	38	269	528	0.51
43	0.2335	0.0023	2.8634	0.0342	0.0890	0.0010	1353	13	1372	16	1403	22	288	620	0.47
44	0.2237	0.0022	2.7174	0.0334	0.0881	0.0010	1302	13	1333	16	1384	22	275	532	0.52
45	0.1708	0.0027	2.5212	0.0327	0.1070	0.0020	1017	16	1278	17	1750	35	131	415	0.32
46	0.0705	0.0006	0.5798	0.0083	0.0596	0.0008	439	4	464	7	591	28	49	1464	0.03
47	0.0720	0.0006	0.5818	0.0090	0.0586	0.0010	448	4	466	7	554	37	190	1528	0.12
48	0.2242	0.0019	2.7070	0.0448	0.0876	0.0013	1304	11	1330	22	1373	28	505	1031	0.49
12TW3 片麻状正长花岗岩															
1	0.2385	0.0019	2.8838	0.0401	0.0877	0.0012	1379	11	1378	19	1376	25	165	289	0.57
2	0.2374	0.0023	2.9046	0.0301	0.0887	0.0009	1373	13	1383	14	1399	18	365	532	0.69
3	0.2366	0.0026	2.8688	0.0283	0.0879	0.0008	1369	15	1374	14	1381	17	376	561	0.67
4	0.2331	0.0028	2.8306	0.0269	0.0881	0.0008	1351	16	1364	13	1384	17	376	561	0.67
5	0.2305	0.0029	2.7973	0.0291	0.0880	0.0009	1337	17	1355	14	1383	19	305	485	0.63
7	0.2106	0.0024	2.5503	0.0597	0.0878	0.0016	1232	14	1287	30	1379	35	187	300	0.62
8	0.2257	0.0030	2.6475	0.0325	0.0851	0.0009	1312	17	1314	16	1317	22	118	350	0.34
9	0.2203	0.0022	2.6323	0.0296	0.0866	0.0009	1284	13	1310	15	1353	20	194	378	0.51
10	0.2193	0.0023	2.6204	0.0326	0.0867	0.0009	1278	13	1306	16	1353	20	377	537	0.70
12	0.2192	0.0026	2.6114	0.0315	0.0864	0.0010	1278	15	1304	16	1347	23	125	320	0.39
13	0.2397	0.0026	2.9353	0.0318	0.0888	0.0009	1385	15	1391	15	1400	19	88	200	0.44
14	0.2383	0.0032	2.8786	0.0314	0.0876	0.0009	1378	18	1376	15	1374	19	156	304	0.51
15	0.2402	0.0028	2.9254	0.0332	0.0883	0.0009	1388	16	1389	16	1390	20	140	270	0.52
16	0.2384	0.0029	2.9069	0.0352	0.0884	0.0010	1378	17	1384	17	1392	22	152	297	0.51
17	0.2423	0.0037	2.9289	0.0423	0.0877	0.0012	1399	21	1389	20	1375	26	201	395	0.51
18	0.2400	0.0024	2.9095	0.0475	0.0879	0.0014	1387	14	1384	23	1381	31	117	248	0.47
20	0.2308	0.0023	2.8487	0.0327	0.0895	0.0010	1339	14	1368	16	1415	21	85	186	0.45
21	0.1822	0.0025	2.0086	0.0557	0.0800	0.0009	1079	15	1118	31	1196	20	147	291	0.50
22	0.2206	0.0021	2.6411	0.0284	0.0868	0.0009	1285	12	1312	14	1357	20	99	241	0.41
23	0.2444	0.0037	2.9870	0.0287	0.0886	0.0009	1410	21	1404	13	1396	19	135	320	0.42
25	0.2452	0.0020	3.0145	0.0305	0.0892	0.0008	1413	11	1411	14	1408	18	300	464	0.65
27	0.2410	0.0021	2.9304	0.0254	0.0882	0.0007	1392	12	1390	12	1387	15	324	485	0.67
28	0.2325	0.0027	2.7533	0.0296	0.0859	0.0009	1348	15	1343	14	1336	20	118	239	0.49
29	0.2368	0.0025	2.9037	0.0338	0.0889	0.0008	1370	14	1383	16	1403	18	223	376	0.59
30	0.2414	0.0028	2.9154	0.0274	0.0876	0.0007	1394	16	1386	13	1374	16	336	519	0.65
31	0.2219	0.0023	2.6507	0.0270	0.0867	0.0008	1292	14	1315	13	1353	18	363	517	0.70
32	0.2403	0.0038	2.9272	0.0345	0.0883	0.0009	1388	22	1389	16	1390	19	287	505	0.57
12TW4 片麻状正长花岗岩															
1	0.2402	0.0033	2.9291	0.0289	0.0885	0.0009	1387	19	1389	14	1392	19	45	147	0.31
2	0.2396	0.0023	2.9235	0.0314	0.0885	0.0009	1385	13	1388	15	1393	20	126	219	0.58
3	0.2404	0.0021	2.9182	0.0312	0.0880	0.0007	1389	12	1387	15	1383	16	160	295	0.54
4	0.2245	0.0020	2.7251	0.0313	0.0880	0.0007	1306	11	1335	15	1383	16	120	256	0.47

续表 1

测点	同位素比值						年龄 (Ma)						(×10 ⁻⁶)		Th/U
	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	Th	U	
5	0.1046	0.0016	1.0201	0.0100	0.0707	0.0007	641	10	714	7	950	22	90	442	0.20
6	0.2349	0.0020	3.0434	0.0322	0.0940	0.0008	1360	12	1419	15	1508	16	104	230	0.45
7	0.2420	0.0035	2.9479	0.0395	0.0883	0.0011	1397	20	1394	19	1390	24	41	100	0.41
8	0.2377	0.0024	2.9054	0.0323	0.0886	0.0007	1375	14	1383	15	1396	16	266	410	0.65
9	0.2433	0.0024	2.9723	0.0305	0.0886	0.0009	1404	14	1401	14	1395	19	88	230	0.38
10	0.2403	0.0021	2.9341	0.0225	0.0886	0.0008	1388	12	1391	11	1394	17	116	240	0.49
11	0.2065	0.0032	2.5188	0.0197	0.0884	0.0008	1210	19	1277	10	1392	17	140	270	0.52
12	0.2435	0.0021	2.9525	0.0309	0.0879	0.0008	1405	12	1396	15	1381	18	83	300	0.27
13	0.1800	0.0018	2.1133	0.0175	0.0851	0.0007	1067	10	1153	10	1319	16	166	492	0.34
14	0.2261	0.0021	2.7647	0.0275	0.0887	0.0010	1314	12	1346	13	1397	21	148	289	0.51
15	0.2351	0.0020	2.8826	0.0338	0.0889	0.0009	1361	12	1377	16	1403	20	45	133	0.34
16	0.2071	0.0037	2.6247	0.0313	0.0919	0.0008	1213	22	1308	16	1466	17	151	305	0.50
17	0.2399	0.0030	2.9026	0.0324	0.0878	0.0008	1386	17	1383	15	1377	18	205	467	0.44
18	0.2401	0.0020	2.9619	0.0252	0.0895	0.0008	1387	12	1398	12	1414	18	114	218	0.53
19	0.2439	0.0034	2.9704	0.0424	0.0883	0.0009	1407	19	1400	20	1389	20	67	143	0.47
20	0.2184	0.0080	2.6503	0.0536	0.0880	0.0014	1273	47	1315	27	1383	30	77	150	0.52
21	0.2228	0.0026	2.7201	0.0231	0.0885	0.0009	1297	15	1334	11	1394	20	127	240	0.53
22	0.2424	0.0056	2.9428	0.0238	0.0880	0.0009	1399	32	1393	11	1383	20	73	159	0.46
23	0.2426	0.0034	2.9654	0.0327	0.0886	0.0010	1400	20	1399	15	1397	21	96	163	0.59
24	0.2427	0.0037	2.9826	0.0317	0.0891	0.0009	1401	21	1403	15	1407	20	45	110	0.41
25	0.2325	0.0026	2.8386	0.0317	0.0885	0.0007	1348	15	1366	15	1394	16	123	223	0.55
26	0.2430	0.0028	2.9627	0.0240	0.0884	0.0008	1402	16	1398	11	1392	17	471	654	0.72

锆石核部 30 个点微区记录的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄大部分相似,有 9 个核部点偏离谐和曲线,铅丢失较为严重,不构成不一致线。其余锆石核部分析点虽然在谐和图上偏离谐和曲线,但可以构成一条不一致线,不一致线与谐和曲线上交点的年龄为 1398±10 Ma(图 3),可代表片麻黑云二长花岗岩的形成时代。18 个锆石边部分析点微区记录的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄十分相似,去除谐和度不理想的 4 个点,剩余的 14 个锆石边部分析点位于谐和线上或附近,14 个位于谐和线及其附近的年龄值变化于 433~496Ma 之间,14 个锆石边部分析点的加权平均年龄为 440±3Ma,反映岩石受变质改造的时间。

3.2 主量、微量元素

选择新鲜的片麻状花岗质岩石样品 16 件,进行了岩石地球化学分析,岩石的主元素和微量元素分析结果见表 2。

3.2.1 主量元素

片麻状正长花岗岩具有高 SiO₂ (76.91%~78.55%),富钾 K₂O (5.11%~6.90%), K₂O>Na₂O, K₂O/Na₂O (1.85~3.54) 和高碱度 K₂O+Na₂O (7.12%~8.85%) 特征;贫 TiO₂ (0.13%~0.35%)、CaO (0.20%~0.59%)、P₂O₅ (0.02%~0.04%)、MgO (0.09%~0.28%) 和 FeO^T (0.24%~1.94%),但 FeO^T/MgO (2.82~21.56), Al₂O₃

偏低(11.33 %~12.31 %),A/CNK (1.05~1.28),里特曼指数 σ(1.44~2.25),属亚碱性系列。片麻状黑云母二长花岗岩也具有较高的 SiO₂ (75.04%~78.15%),K₂O (2.25%~5.36%),除 1 个样品外,岩石富钾 K₂O>Na₂O, K₂O/Na₂O (1.01~2.08),高碱度 K₂O+Na₂O (5.6%~8.07%);低 TiO₂ (0.13%~0.35%)、CaO (0.48%~1.5%)、P₂O₅ (0.01%~0.07%)、MgO (0.11%~0.28%) 和 FeO^T (1.20%~3.18%),但 FeO^T/MgO (5.84~19.88),Al₂O₃ 偏低 (10.68%~12.72%),A/CNK (0.99~1.19),里特曼指数 σ(0.89~1.91),也属亚碱性系列。在 TAS 图中两类岩石均落入花岗岩区,在 A/CNK-A/NK 图解中也多落入弱过铝质区(图 4)。

3.2.2 微量和稀土元素

片麻状正长花岗岩与片麻状黑云母二长花岗岩微量元素具有高度一致的地球化学特征,表现为相对富集大离子亲石元素、贫高场强元素。两类片麻状花岗岩均富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素,弱亏损 Ba,以及 Sr、P、Ti 的强烈亏损(图 5a),暗示了长石、磷灰石以及榍石、角闪石、黑云母等矿物的分离结晶作用,与铝质 A 型花岗岩较为一致,A 型花岗岩明显的 P 负异常和低 P₂O₅ 含量是区别于 S 型花岗岩的标志。

片麻状正长花岗岩的稀土总量∑REE(289.1×

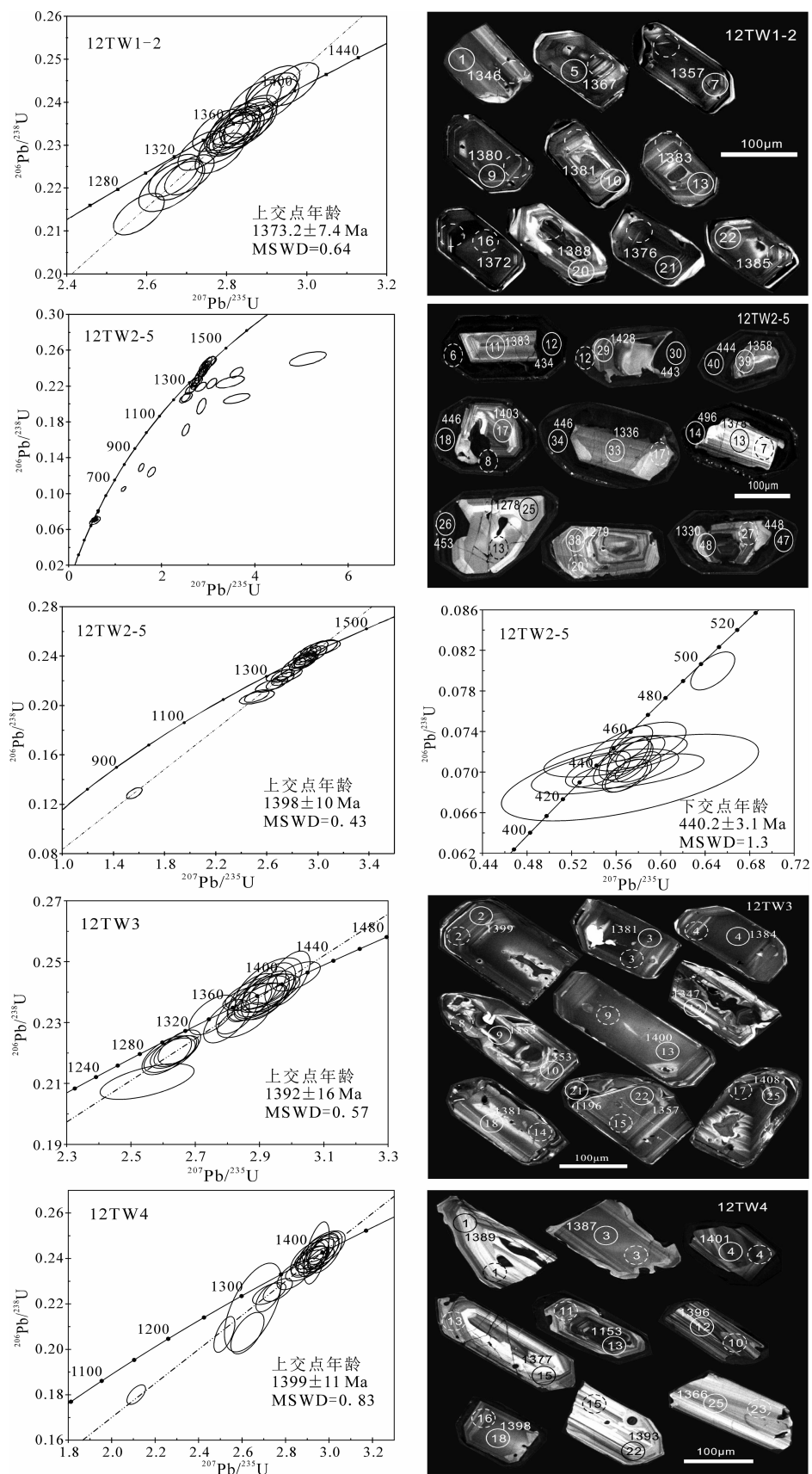


图 3 内蒙苏左旗地区片麻状花岗岩样品锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图和锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia polts and CL images from the gneiss granite in Sonid Left Banner area, Inner Mongolia

表 2 苏尼特左旗片麻状花岗岩主量元素(%)、微量元素(×10 ⁻⁶)化学成分																
Table 2 Chemical compositions of major elements (%) and trace elements (×10 ⁻⁶) of the gneiss-granites from Sonid Left Banner area																
岩性	片麻状二长花岗岩									片麻状正长花岗岩						
样品	12GS1-2	12GS2-4	12GS2-5	12GS3	12GS3-2	12GS3-3	12GS4	12GS4-2	12GS2-4	12GS2-5	12GS3	12GS3-2	12GS3-3	12GS4	12GS4-2	12GS4-3
SiO ₂	76.26	75.04	75.44	77.41	78.15	76.72	77.02	76.79	78.25	75.07	78.06	77.86	76.91	78.55	77.48	77.92
TiO ₂	0.22	0.3	0.35	0.22	0.27	0.21	0.13	0.23	0.26	0.32	0.23	0.35	0.16	0.34	0.13	0.21
Al ₂ O ₃	11.87	12.54	12.3	11.94	10.68	12.08	12.01	11.84	11.6	12.72	11.47	12.31	11.74	12.23	11.81	11.33
Fe ₂ O ₃	1.58	1.46	0.76	0.83	1.51	0.64	0.76	1.09	0.77	1.29	0.74	0.1	0.75	0.27	0.47	1.69
FeO	0.7	1.48	2.36	1.1	0.81	0.88	0.52	1.13	0.7	2.02	0.55	0.15	0.96	0.63	0.68	0.42
MnO	0.04	0.07	0.16	0.04	0.012	0.08	0.01	0.029	0.03	0.06	0.04	0.003	0.028	0.02	0.01	0.018
MgO	0.14	0.17	0.2	0.28	0.23	0.25	0.11	0.21	0.28	0.16	0.24	0.085	0.1	0.28	0.11	0.09
CaO	0.82	1.04	1.11	0.48	1.41	0.64	0.69	0.98	0.2	1.5	0.21	0.35	0.59	0.21	0.32	0.29
Na ₂ O	2.74	2.7	2.7	2.52	3.35	2.58	3.05	2.83	1.76	3.08	1.84	1.95	1.96	2.31	2.61	2.76
K ₂ O	5.01	4.56	4.1	4.61	2.25	5.36	5.02	4.19	5.36	3.12	6.18	6.9	6.2	5.33	5.66	5.11
P ₂ O ₅	0.01	0.06	0.07	0.02	0.014	0.03	0.012	0.013	0.04	0.07	0.03	0.035	0.025	0.04	0.033	0.017
LOI	0.54	0.42	0.18	0.43	0.93	0.45	0.62	0.53	0.68	0.37	0.33	0.51	0.47	1.62	0.61	0.12
Total	99.93	99.84	99.73	99.88	99.92	99.92	99.95	99.86	99.93	99.78	99.92	99.98	99.89	99.93	99.92	99.97
ACNK	1.04	1.11	1.13	1.19	1.1	1.08	1.03	1.08	1.28	1.14	1.14	1.06	1.07	1.02	1.07	1.07
FeO ⁺ /MgO	15.14	16.41	15.2	6.61	9.43	5.84	10.91	10.05	4.96	19.88	5.08	2.82	16.3	3.11	10	21.56
K ₂ O/Na ₂ O	1.83	1.69	1.52	1.83	0.76	2.08	1.65	1.48	3.05	1.01	3.36	3.54	3.16	1.61	2.17	1.85
Σ	1.81	1.65	1.43	1.48	0.99	1.87	1.91	1.46	1.44	1.2	1.83	2.25	1.96	2.1	1.98	1.77
Ba	1240	1090	1010	1170	294	1320	551	1180	1020	819	1400	1300	922	297	1320	971
Rb	173	102	97	100	72.8	137	156	120	150	102	164	167	173	173	131	112
Sr	56.4	81.4	81.1	63.5	88.7	115	88.5	79.7	41.5	88.5	87.9	141	54.9	26.7	98	70.6
Y	24.1	50.9	55.7	18.3	31.1	43	20.6	51.2	58.3	46.8	32.6	23	18.8	65.3	34.2	30.4
Zr	471	458	522	404	522	460	259	460	410	503	376	295	302	578	351	479
Nb	26	15.8	16.9	14.2	21.1	12.6	34.8	28.5	21	21.2	13	10.53	10.4	26.9	13.9	11.2
Th	24	18.8	22.4	21.9	32.6	31.8	25.9	30.3	25.7	16.6	24.9	25	22	32.3	36.8	32.4
Ga	17.1	19.6	18.2	16.6	21	16.9	19.1	20.4	18.5	21.4	13.7	12.2	15	23.5	15.6	17.2
Ni	4.3	5.48	3.94	3.67	2.24	3.13	1.89	1.97	2.99	4.74	3.59	0.06	1.62	1.66	2.24	1.52
V	6.37	22.4	19.7	4.46	17.2	6.97	5.82	6.69	20	20.2	15.8	4.28	6.92	12.6	10.1	13.9
Cr	3.14	3.34	3.09	3.57	1.16	3.37	1.59	2.19	4.29	3.65	4.27	0.85	1.66	3.25	3.39	1.49
Hf	13.6	12.1	13.8	11.6	14.7	13	8.78	13.4	11.1	13.3	10.7	8.41	8.86	15.3	10.1	14.2
Cs	2.2	1.81	2.15	1.56	7.21	1.94	3.57	0.91	1.78	2.28	1.47	1.72	1.61	2.89	2.12	1.09
Sc	2.14	15.1	15.2	5.66	5.73	7.15	5.88	7.08	11.3	18	6.58	3.52	5.02	12	4.96	5.32
Ta	0.88	0.66	0.81	0.6	0.53	0.54	1.92	0.81	1.09	1.06	0.6	0.15	0.2	1.51	0.36	0.27
Co	1.62	3.17	2.06	1.73	4.35	1.73	1.49	1.56	1.57	2.05	2.56	0.47	1.32	0.92	1.41	1.81
U	1.59	1.18	1.89	1.21	2.36	1.91	1.28	1.52	4.29	1.34	2.59	1.06	1.24	3.88	1.3	1.59
La	112	80.4	62.3	59.6	153	71.9	43.3	119	96.8	49.3	71.1	58.9	99.3	123	129	106
Ce	216	152	112	109	214	138	96.3	166	174	89.6	130	127	153	233	211	215
Pr	21.7	17.2	14.5	14	32.9	16.7	8.96	26.3	21.7	12	16.2	14.8	21.4	27.8	27.6	23.8
Nd	79.8	66.2	54.6	50.2	118	61.1	32.8	97.1	79.9	46.6	60.4	55.2	76.2	102	98.2	85.8
Sm	13.8	12.4	10.7	8.48	18.9	11	6.15	17.1	14.9	9.51	11.2	10.2	12.1	18.1	15.4	14.3
Eu	2.25	2.58	1.81	1.73	1.76	1.99	1.07	2.16	1.73	1.86	2.25	1.48	1.56	1.51	1.83	1.59
Gd	12	11.2	9.93	7.5	15	9.96	5.67	15.1	13.8	8.58	9.93	8.4	9.44	16	12.8	11.4
Tb	1.59	1.86	1.71	0.98	1.8	1.53	0.81	2.17	2.23	1.5	1.43	1.13	1.16	2.57	1.6	1.43
Dy	7.3	10.6	10.6	4.37	8.03	8.45	4.55	12.2	11.8	9	6.87	5.6	5.35	13.9	7.73	7.09
Ho	1.26	2.2	2.35	0.8	1.31	1.74	0.9	2.33	2.28	1.91	1.31	0.97	0.88	2.71	1.36	1.31
Er	3.34	6.54	6.85	2.36	2.65	5.34	2.65	6.18	6.61	5.8	3.89	2.5	2.23	7.49	3.39	3.8
Tm	0.44	1.03	1.06	0.35	0.38	0.81	0.44	0.86	0.96	0.94	0.57	0.34	0.27	1.09	0.41	0.54
Yb	2.76	6.47	6.78	2.28	2.4	5.27	3.37	5.44	5.88	6	3.83	2.25	1.86	6.6	2.56	3.81
Lu	0.41	1	1.01	0.35	0.36	0.8	0.51	0.75	0.88	0.94	0.6	0.32	0.28	0.95	0.36	0.58
ΣREE	283.45	365.49	345.78	193.35	308.45	301.77	174.85	383.06	374.59	305.18	267.63	204.13	225.18	421	288.48	270.09
δEu	0.52	0.66	0.53	0.65	0.31	0.57	0.54	0.4	0.36	0.62	0.64	0.47	0.43	0.27	0.39	0.37
(La/Sm) _N	5.24	4.19	3.76	4.54	5.23	4.22	4.55	4.49	4.19	3.35	4.1	3.73	5.3	4.39	5.41	4.79
(La/Yb) _N	29.11	8.91	6.59	18.75	45.73	9.79	9.22	15.69	11.81	5.89	13.32	18.78	38.29	13.37	36.15	19.96
(Gd/Yb) _N	3.6	1.43	1.21	2.72	5.17	1.56	1.39	2.3	1.94	1.18	2.14	3.09	4.2	2.01	4.14	2.48
t _{2t} (℃)	896	899	915	896	908	898	835	898	907	912	885	854	854	939	870	903

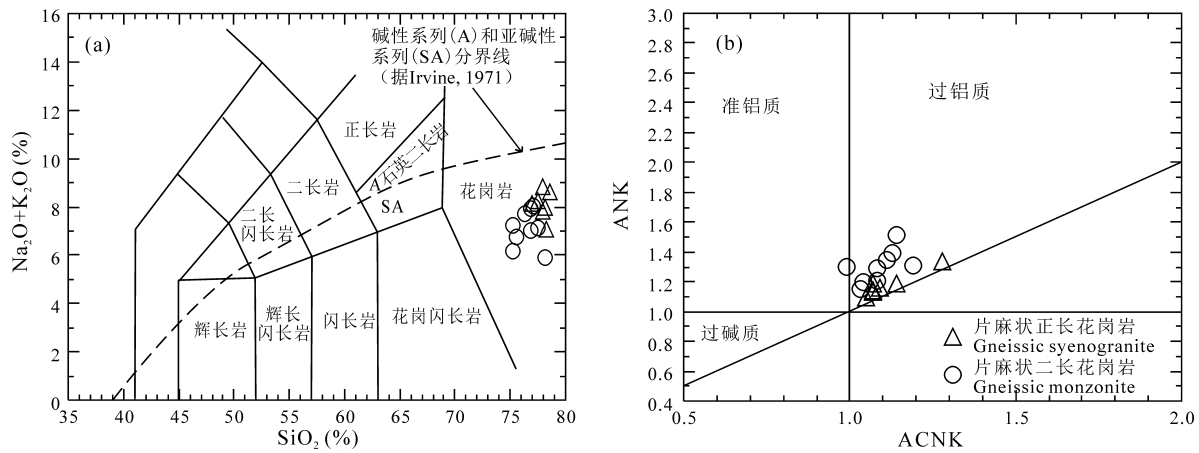


图 4 苏左旗片麻花岗岩的化学分类

Fig. 4 Chemical classification of gneiss-granite from the Sonid Left Banner area

(a)—TAS 图(据 Middlemost, 1994); (b)—ACNK-A/NK 图解(据 Chappell and White, 1974)

(a)—TAS diagram (after Middlemost, 1994); (b)—A/CNK-A/NK diagram (after Chappell and White, 1974)

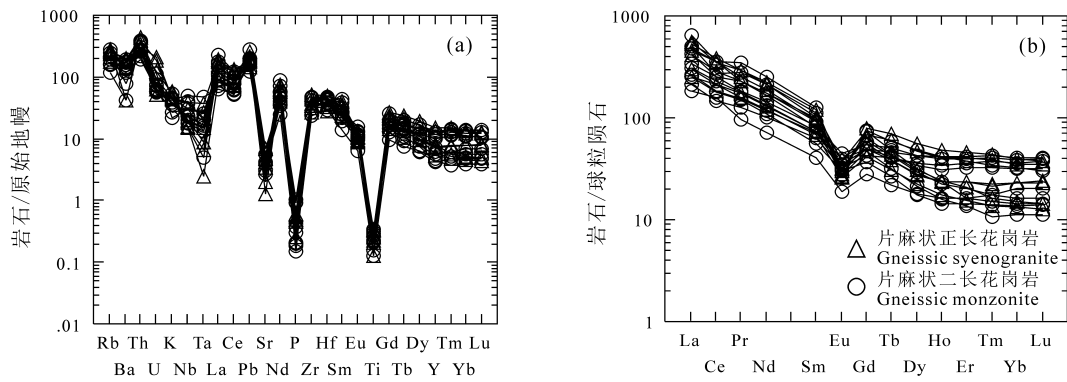


图 5 苏尼特左旗片麻状花岗质岩石微量元素原始地幔标准化(a)和稀土元素球粒陨石标准化图(b)

(球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Standardization of trace element normal mantle normalization (a) and rare earth element chondrite map (b) of gneissic granites from Sonid Left Banner area (chondrites and mantle normalized values according to Sun and McDonough, 1989)

$10^{-6} \sim 556.7 \times 10^{-6}$)和片麻状黑云母二长花岗岩的 $\Sigma\text{REE}(207.5 \times 10^{-6} \sim 570.5 \times 10^{-6})$ 高(表 2), 稀土分布曲线形状相似(图 5b), 它们都具有轻稀土相对富集的特征, 前者的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 11.81 \sim 38.29$, 稀土分馏程度较大, 稀土曲线右倾, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3.73 \sim 5.41$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.94 \sim 4.20$; 后者的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 6.59 \sim 45.73$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 3.35 \sim 5.24$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.18 \sim 5.17$; 重稀土部分相对较为平坦, 各样品之间无明显差异, 两类岩石具有明显负 Eu 异常, 前者 $\delta\text{Eu} = 0.27 \sim 0.64$ 、后者 $\delta\text{Eu} = 0.31 \sim 0.66$; 在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线上呈明显的“右倾”稀土模式(图 5b)。

3.2.3 全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Lu-Hf 同位素

在测试的样品中选择 6 件代表性样品进行了 Sr-Nd 同位素分析(表 3), 结果显示片麻状花岗岩

的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}}$ 值变化于 $0.7053 \sim 0.7344$, 与大陆地壳 $(0.706 \sim 0.718)$ 基本相当; 以该期变质花岗岩形成年龄 $\sim 1398\text{Ma}$ 计算, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{i}} = 0.510831 \sim 0.510881$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值除一个接近零的负值 (-0.2) 外, 其他均为较小正值 $(0.3 \sim 1.0)$, 反映弱亏损的地幔源区或地壳物质混染造成的。二阶段模式年龄相对集中于 $1.88 \sim 1.97\text{Ga}$ 。

在 LA-ICP-MS 锆石定年基础上, 选择 12TW1-2, 12TW2-5, 12TW3, 12TW4 样品进行了锆石微区 Lu-Hf 同位素分析, 其结果列于表 4。

表 4 中大部分锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.002 (表 4), 表明锆石在形成以后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积累, 所测样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本可以代表其形成时体系的 Hf 同位素组成(Wu Fuyun et al., 2007)。样品 12TW1-2 共分析

表 3 苏尼特左旗片麻状花岗岩的 Sm-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic composition of the gneissic granite of Sonid Left Banner area

样品号	Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ (×10 ⁻⁶)	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM1} (Ga)	<i>T</i> _{DM2} (Ga)	Sr	Rb	Rb/Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr / ⁸⁶ Sr) _i
	(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)	¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁴ Nd						(×10 ⁻⁶)	(×10 ⁻⁶)					
12GS1-2	3.05	18.1	0.1018	0.511796	3	0.510878	0.3	1.842	1.922	143	81.7	1.7503	0.807296	5	5.065	0.7056
12GS2-5	5.56	34.0	0.0988	0.511769	4	0.510861	0.6	1.830	1.916	149	116	1.2845	0.779915	8	3.717	0.7053
12GS3-2	10.2	55.2	0.1116	0.511852	2	0.510831	-0.2	1.936	1.972	167	141	1.1844	0.774474	10	3.427	0.7057
12GS3-3	12.1	76.2	0.0959	0.511737	4	0.510860	0.4	1.827	1.927	173	54.9	3.1512	0.917484	9	9.118	0.7344
12GS4-2	15.4	98.2	0.0948	0.511752	2	0.510881	1.0	1.789	1.884	131	98.0	1.3367	0.793517	7	3.868	0.7159
12GS4-3	14.3	85.8	0.1007	0.511770	3	0.510844	0.3	1.859	1.942	112	70.6	1.5864	0.807781	6	4.565	0.7161

了 25 个点,所测锆石的¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值范围分别为 0.0228~0.0782,0.0008~0.0025(表 4)。除 3 颗锆石¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值大于 0.002 外,其余锆石的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值均小于 0.002。图 6a 显示锆石点集中于球粒陨石演化线上方,样品 12TW1-2 所测 25 颗锆石的 Hf 同位素相对比较均一,其中¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值变化于 0.281978~0.282075,加权平均值为 0.2820222±0.000013(2s, *n*=25);Hf 同位素初始比值(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i分布在 0.281940~0.282044 之间,平均值为 0.281983;ε_{Hf}变化于+0.9~+4.8,平均为+2.5,ε_{Hf}均为正值,表明来源于亏损地幔。单阶段模式年龄变化范围为 1.67~1.82Ga,平均为 1.76Ga。

对样品 12TW2-5 已测年龄的锆石进行了 29 个点原位 Hf 同位素分析,分析结果(表 4),除去 4 粒继承锆石外,25 粒测年锆石中锆石核部相同颗粒 15 个点和边部 10 个点,锆石边部 10 个点的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值变化于 0.282163~0.282300,加权平均值为 0.282208±0.000015(2σ, *n*=6),ε_{Hf}(*t*)多为负值,变化于-7.5~-12.6,指示古老地壳源区,单阶段模式年龄 *T*_{DM1} 变化范围为 1.36~1.53Ga,两阶段模式年龄 *T*_{DM2} 变化范围为 1.89~2.20Ga,*t*_{DM} 远大于岩石形成年龄,揭示出岩浆来源于古元古代古老地壳岩石的部分熔融;锆石核部 17 个点位于球粒陨石线的上方(图 6b),¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值变化于 0.281987~0.282258,加权平均值为 0.282082±0.000015(2σ, *n*=17),ε_{Hf}(*t*)均为正值,变化于+2~+11.0,表明岩浆来源于亏损地幔源区。单阶段模式年龄 *T*_{DM1} 变化范围为 1.43~1.79Ga,两阶段模式年龄 *T*_{DM2} 变化范围为 1.45~2.04Ga,*T*_{DM2} 远大于其形成年龄,当 ε_{Hf}(*t*)为最大+11.0 时,单阶段模式年龄 *T*_{DM1} 和 *T*_{DM2} 与岩石形成年龄近于一致,表明在~1.40Ga 时存在一次地幔物质的加入,揭示中元古代存在地壳增生事件。

对样品 12TW3 共分析了 22 个点,所测锆石

的¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值范围分别为 0.0210~0.0725,0.0007~0.0025(表 4)。图 6c 显示锆石点集中于球粒陨石演化线上方,样品 12TW3 所测 22 颗锆石的 Hf 同位素相对比较均一,其中¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值变化于 0.281961~0.282104,加权平均值为 0.281999±0.000015(2s, *n*=22);Hf 同位素初始比值(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i分布在 0.281902~0.282072 之间,平均值为 0.2819619;ε_{Hf}变化于+0.2~+6.6,平均为 2.15,ε_{Hf}均为正值,表明岩浆来源新生地壳或新生地壳与古老地壳物质的混合。单阶段模式年龄变化范围为 1.63~1.88Ga,平均为 1.78Ga,两阶段模式年龄变化范围为 1.76~2.17Ga。

样品 12TW4 共分析了 23 个点,所测锆石的¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值范围分别为 0.0277~0.0575,0.0007~0.0018(表 3)。图 6d 显示锆石点集中于球粒陨石演化线上方,样品 12TW4 所测 23 颗锆石的 Hf 同位素相对比较均一,其中¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值变化于 0.281966~0.282199,加权平均值为 0.282035±0.000014(2s, *n*=23);Hf 同位素初始比值(¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i分布在 0.281924~0.282145 之间,平均值为 0.281999;ε_{Hf}变化于+0.8~+8.7,平均为 3.5,ε_{Hf}均为正值,指示亏损地幔来源。单阶段模式年龄变化范围为 1.50~1.84Ga,平均为 1.73Ga。两阶段模式年龄变化范围为 1.61~2.11Ga。

4 讨论

花岗岩类由于具有特征的矿物组合和地球化学特征,因而,常常依据矿物组成和地球化学来判别岩石的成因类型,目前主要有 I、S、M 和 A 型花岗岩(Loiselle and Wones, 1979; Chappel and White, 1974; Pitcher, 1983)。其中 A 型花岗岩的成因分类、岩浆起源、大地构造背景及其地球动力学意义的研究广受关注(Collins et al., 1982; Whalen et al.,

1987; Eby, 1990, 1992; Hu Shouxi et al., 1991; Hong Dawei et al., 1995, 1996; Liu Changshi et al., 2003; Zhang Qi et al., 2012; Xu Bowen et al., 2015; Duan Zheng et al., 2017; Deng Qi et al., 2017)。A 型花岗岩为“非造山、碱性和贫水的花岗岩”,具有富碱,高 $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ 、 Rb/Sr 、HFSE,低 Ca 、 Fe 、 Mg ,强烈亏损 Eu 、 Sr 、 Ba 、 P 、 Ti 的特点 (Collins et al., 1982; King et al., 1997);按成分特点分为铝质和过碱性两类,其成因观点多样 (Collins et al., 1982; Bonin, 2007)。然而,对其形成环境普遍认为与伸展作用有关 (Frost et al., 1999, 2007)。因此,A 型花岗岩的确定已成为判别陆壳伸展构造环境的重要岩石学依据之一。

4.1 岩石成因类型

本文研究的中元古代片麻状花岗岩类为亚碱性过铝质岩石,矿物组合以石英、钾长石(条纹长石、微斜长石)和黑云母为主,其较高的 SiO_2 和 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$,低 CaO 、 MgO 、 P_2O_5 、 TiO_2 和 MnO ,高场强元素如 Th 、 U 、 Zr 、 Hf 相对于大离子亲石元素明显富集,富集 Rb 、 REE 和 Th 、 U 、 Zr 、 Hf 等元素,明显亏损 Ba 、 Sr 、 Ti 、 P 、 Eu 等元素,显示 A 型花岗岩特征。 A/CNK 值(1.02~1.28),显示为过铝质花岗岩;具有较高的 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=5.6\sim 8.85$ 、 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ 比值和高 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 含量, $\text{Ga}/\text{Al}=5.05\sim 10.03$,高于 A 型花岗岩的平均值 3.75 (Whalen et al., 1987),与 King et al. (1997)定义

的铝质 A 型花岗岩相似。在以 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 和 $10000\times\text{Ga}/\text{Al}$ (图 7) 为横坐标的图解中,中元古代片麻状花岗岩投点均落入 A 型花岗岩区域 (Whalen et al., 1987; Frost and Frost, 2011)。同样在 SiO_2 与 $\text{FeO}^{\text{T}}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO})$ 和 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ 图解 (Frost and Frost, 2011)、 $\text{CaO}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO}+\text{TiO}_2)$ 与 $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO})$ 和 $\text{CaO}/(\text{FeO}^{\text{T}}+\text{MgO}+\text{TiO}_2)$ 与 Al_2O_3 图解中 (Dall’Agnol 和 de Oliveira, 2007)也得到了证实,中元古代片麻状花岗岩投点大部分均落入 A 型花岗岩区域(图 8)。A 型花岗岩相对于 I 型和 S 型具有更高的成岩温度,通过锆石饱和温度计得出的结晶温度一般达到 800°C 以上 (Liu Changshi et al., 2003),而岩石学实验表明其形成温度可能超过 900°C 。为了进一步确认 A 型花岗岩的高温属性,采用 Watson et al. (1983)的方法估算了中元古代片麻状花岗岩的形成温度。由表 2 中的岩石化学分析结果可得出中元古代 A 型花岗岩的形成温度在 $835\sim 939^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 892°C (表 2)。

4.2 岩石源区

岩石全岩 Nd 同位素分析可较好揭示其岩石源区特征,进而反映地壳形成和演化 (De Paolo, 1981)。本文片麻状花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值除一个接近零的负值 (-0.2) 外,其他均为较小正值 ($0.3\sim 1.0$),反映弱亏损的地幔源区或地壳物质混染造成的。二阶段模式年龄相对集中于 ($1.88\sim 1.97\text{Ga}$)。与花岗岩全岩 Sm-Nd 同位素相比,花岗岩锆石原位

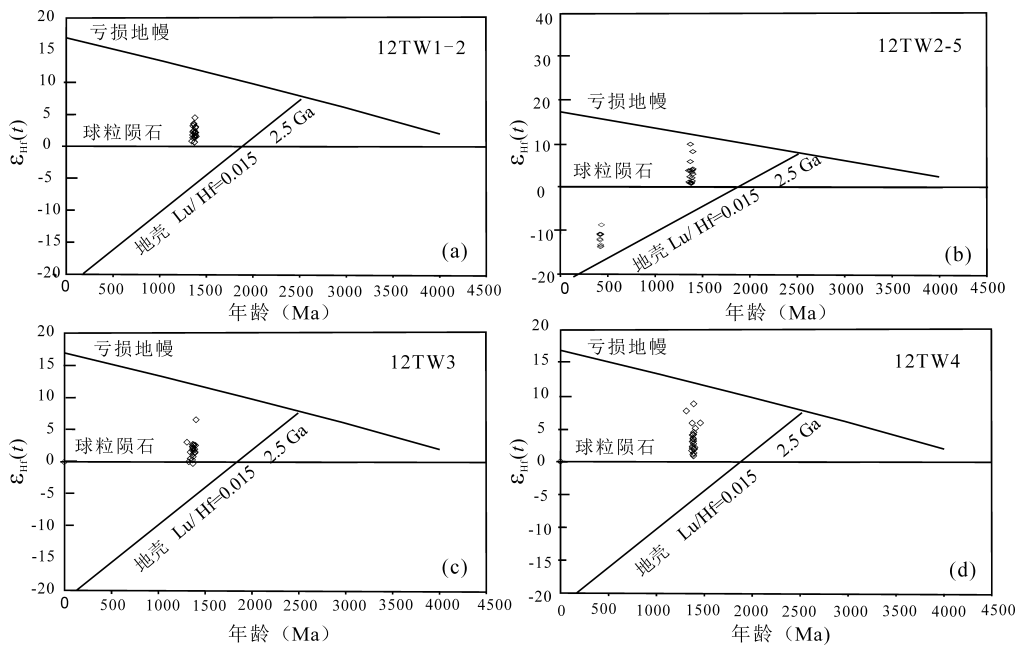


图 6 苏尼特左旗片麻状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 相关图

Fig. 6 Zircon U-Pb age correlates with $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of gneissic granite from Sonid Left Banner area

表 4 苏尼特左旗样品 Lu-Hf 同位素分析数据和相关的特征参数

Table 4 Lu-Hf isotopic data and related parameters of analyzed sample from the Sonid Left Banner area

测点	年龄(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2s	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _i	ε _{Hf} (t)	2s	T _{DM1} (Ga)	T _{DM2} (Ga)	f _{Lu/Hf}
12TW1-2 片麻状二长花岗岩											
1	1346	0.0403	0.0012	0.281993	0.000013	0.281962	1.1	0.5	1.78	2.06	−0.96
2	1357	0.0612	0.0019	0.282019	0.000012	0.281970	1.6	0.4	1.78	2.03	−0.94
3	1363	0.0360	0.0012	0.282027	0.000011	0.281996	2.7	0.4	1.73	1.97	−0.96
4	1372	0.0526	0.0017	0.282038	0.000013	0.281994	2.8	0.5	1.74	1.97	−0.95
5	1367	0.0381	0.0013	0.282055	0.000014	0.282021	3.7	0.5	1.70	1.91	−0.96
6	1369	0.0430	0.0014	0.282003	0.000013	0.281967	1.8	0.5	1.78	2.03	−0.96
7	1357	0.0472	0.0016	0.282037	0.000011	0.281996	2.6	0.4	1.74	1.97	−0.95
8	1355	0.0452	0.0015	0.282022	0.000012	0.281984	2.1	0.4	1.76	2.00	−0.95
9	1380	0.0720	0.0024	0.282023	0.000015	0.281960	1.8	0.5	1.80	2.04	−0.93
10	1381	0.0368	0.0012	0.281996	0.000016	0.281965	2.0	0.6	1.78	2.03	−0.96
11	1376	0.0314	0.0010	0.282008	0.000011	0.281982	2.5	0.4	1.75	1.99	−0.97
12	1385	0.0595	0.0019	0.282047	0.000015	0.281997	3.2	0.5	1.74	1.95	−0.94
13	1383	0.0782	0.0025	0.282031	0.000014	0.281966	2.1	0.5	1.79	2.03	−0.92
14	1373	0.0496	0.0017	0.281984	0.000013	0.281940	0.9	0.5	1.82	2.09	−0.95
15	1380	0.0355	0.0012	0.282075	0.000014	0.282044	4.8	0.5	1.67	1.85	−0.96
16	1372	0.0345	0.0012	0.282025	0.000014	0.281994	2.8	0.5	1.74	1.97	−0.96
17	1376	0.0456	0.0015	0.281999	0.000015	0.281960	1.7	0.5	1.79	2.04	−0.95
18	1387	0.0529	0.0018	0.282046	0.000014	0.281999	3.3	0.5	1.74	1.95	−0.95
19	1393	0.0443	0.0014	0.281990	0.000014	0.281953	1.9	0.5	1.80	2.05	−0.96
20	1388	0.0228	0.0008	0.281994	0.000013	0.281973	2.5	0.5	1.76	2.01	−0.98
21	1376	0.0481	0.0015	0.281978	0.000014	0.281939	1.0	0.5	1.82	2.09	−0.95
22	1385	0.0694	0.0022	0.282034	0.000014	0.281976	2.5	0.5	1.77	2.00	−0.93
23	1380	0.0439	0.0015	0.282016	0.000014	0.281977	2.4	0.5	1.76	2.00	−0.95
24	1358	0.0260	0.0009	0.282045	0.000012	0.282022	3.5	0.4	1.70	1.91	−0.97
25	1367	0.0569	0.0017	0.282070	0.000014	0.282026	3.9	0.5	1.70	1.90	−0.95
12TW2-5 片麻状黑云母二长花岗岩											
1	1383	0.0515	0.0015	0.282046	0.000014	0.282007	3.5	0.5	1.72	1.93	−0.95
2	1401	0.0606	0.0019	0.282075	0.000013	0.282025	4.6	0.5	1.70	1.88	−0.94
3	1389	0.0428	0.0014	0.282081	0.000015	0.282044	5.0	0.5	1.67	1.84	−0.96
8	437	0.0818	0.0024	0.282252	0.000018	0.282232	−9.8	0.6	1.47	2.03	−0.93
10	438	0.0585	0.0017	0.28225	0.000013	0.282236	−9.7	0.5	1.44	2.02	−0.95
12	434	0.0729	0.0021	0.282223	0.000013	0.282206	−10.8	0.5	1.50	2.09	−0.94
13	1395	0.0383	0.0012	0.281987	0.000014	0.281955	2.0	0.5	1.79	2.04	−0.96
18	446	0.0356	0.0013	0.282163	0.000014	0.282152	−12.5	0.5	1.55	2.20	−0.96
20	437	0.0317	0.001	0.282206	0.000014	0.282198	−11.1	0.5	1.48	2.10	−0.97
23	1408	0.0389	0.0013	0.28207	0.000014	0.282035	5.1	0.5	1.68	1.85	−0.96
24	1387	0.0539	0.0018	0.282263	0.000013	0.282216	11.0	0.5	1.43	1.45	−0.95
25	1386	0.0263	0.0009	0.282127	0.000011	0.282103	7.0	0.4	1.58	1.71	−0.97
28	433	0.0762	0.0022	0.282258	0.000015	0.282240	−9.6	0.5	1.45	2.01	−0.93
30	443	0.0346	0.0011	0.282172	0.000014	0.282163	−12.2	0.5	1.53	2.18	−0.97
32	451	0.0415	0.0014	0.282300	0.000013	0.282288	−7.5	0.5	1.36	1.89	−0.96
33	1412	0.035	0.0012	0.282184	0.000018	0.282152	9.3	0.6	1.51	1.58	−0.96
34	446	0.0573	0.0018	0.282246	0.000015	0.282231	−9.7	0.5	1.45	2.02	−0.95
35	1412	0.0504	0.0016	0.282048	0.000015	0.282005	4.1	0.5	1.72	1.92	−0.95
38	1397	0.0341	0.0011	0.281989	0.000013	0.281960	2.2	0.5	1.78	2.03	−0.97
37	1369	0.0694	0.0022	0.282113	0.000021	0.282056	5.0	0.7	1.66	1.83	−0.93
41	1414	0.0473	0.0015	0.282078	0.000017	0.282038	5.3	0.6	1.68	1.84	−0.95
42	1406	0.0642	0.0019	0.282015	0.000016	0.281965	2.6	0.6	1.78	2.01	−0.94
43	1403	0.0574	0.0017	0.282032	0.000015	0.281987	3.3	0.5	1.75	1.96	−0.95
44	1384	0.0749	0.0023	0.282026	0.000016	0.281966	2.1	0.6	1.79	2.02	−0.93
46	439	0.0385	0.0013	0.282163	0.000017	0.282152	−12.6	0.6	1.55	2.20	−0.96
48	1373	0.0604	0.0019	0.282029	0.000014	0.281980	2.3	0.5	1.76	2.00	−0.94

续表 4

测点	年龄(Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2s	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _i	ε _{Hf} (<i>t</i>)	2s	<i>T</i> _{DM1} (Ga)	<i>T</i> _{DM2} (Ga)	<i>f</i> _{Lu/Hf}
12TW3 片麻状正长花岗岩											
1	1376	0.0302	0.0009	0.282003	0.000012	0.281980	2.4	0.4	1.75	2.00	−0.97
2	1399	0.032	0.001	0.28198	0.000016	0.281954	2.0	0.6	1.79	2.04	−0.97
3	1381	0.0383	0.0012	0.282001	0.000014	0.281970	2.2	0.5	1.77	2.02	−0.96
4	1384	0.0271	0.0009	0.281995	0.000014	0.281971	2.3	0.5	1.77	2.01	−0.97
5	1383	0.0566	0.0017	0.281975	0.000011	0.281931	0.8	0.4	1.83	2.10	−0.95
7	1379	0.0515	0.0017	0.282031	0.000015	0.281987	2.7	0.5	1.75	1.98	−0.95
8	1317	0.0289	0.0009	0.282059	0.000016	0.282037	3.1	0.6	1.68	1.91	−0.97
9	1353	0.0829	0.0025	0.282034	0.000018	0.281970	1.6	0.6	1.79	2.04	−0.92
13	1400	0.0585	0.0018	0.281984	0.000015	0.281936	1.4	0.5	1.82	2.08	−0.95
14	1374	0.0327	0.0011	0.281994	0.000015	0.281965	1.9	0.5	1.78	2.03	−0.97
15	1390	0.0242	0.0007	0.281973	0.000015	0.281955	1.8	0.5	1.79	2.05	−0.98
16	1392	0.0425	0.0013	0.28201	0.000015	0.281976	2.6	0.5	1.76	2.00	−0.96
17	1375	0.0613	0.0019	0.281971	0.000016	0.281922	0.3	0.6	1.85	2.13	−0.94
18	1381	0.0725	0.0023	0.281962	0.000016	0.281902	−0.2	0.6	1.88	2.17	−0.93
20	1415	0.0355	0.0012	0.282104	0.000014	0.282072	6.6	0.5	1.63	1.76	−0.96
25	1408	0.0642	0.0021	0.28202	0.000016	0.281964	2.6	0.6	1.79	2.01	−0.94
27	1387	0.0268	0.0009	0.281965	0.000013	0.281941	1.3	0.5	1.81	2.08	−0.97
28	1336	0.0476	0.0016	0.281979	0.000015	0.281939	0.0	0.5	1.82	2.12	−0.95
29	1403	0.0634	0.0021	0.281994	0.000017	0.281938	1.6	0.6	1.82	2.07	−0.94
31	1353	0.0472	0.0015	0.28198	0.000014	0.281942	0.5	0.5	1.81	2.10	−0.95
32	1390	0.036	0.0012	0.28201	0.000013	0.281978	2.7	0.5	1.76	1.99	−0.96
12TW4 片麻状正长花岗岩											
1	1392	0.0325	0.0011	0.282026	0.000014	0.281997	3.4	0.5	1.73	1.95	−0.97
2	1393	0.0419	0.0014	0.282053	0.000019	0.282016	4.1	0.7	1.71	1.90	−0.96
3	1383	0.0233	0.0008	0.281985	0.000013	0.281964	2.0	0.5	1.77	2.03	−0.98
4	1383	0.0408	0.0013	0.282054	0.000015	0.282020	4.0	0.5	1.70	1.90	−0.96
7	1390	0.0292	0.001	0.282028	0.000014	0.282002	3.5	0.5	1.72	1.94	−0.97
8	1396	0.046	0.0016	0.282187	0.000024	0.282145	8.7	0.8	1.53	1.61	−0.95
9	1395	0.0398	0.0013	0.281988	0.000013	0.281954	1.9	0.5	1.79	2.04	−0.96
10	1394	0.0502	0.0016	0.282029	0.000015	0.281987	3.1	0.5	1.75	1.97	−0.95
11	1392	0.0368	0.0013	0.28205	0.000015	0.282016	4.1	0.5	1.71	1.91	−0.96
12	1381	0.0469	0.0016	0.282114	0.000015	0.282072	5.8	0.5	1.63	1.78	−0.95
13	1319	0.0389	0.0014	0.282199	0.000016	0.282164	7.7	0.6	1.50	1.62	−0.96
14	1397	0.0523	0.0018	0.28207	0.000016	0.282022	4.4	0.6	1.70	1.89	−0.95
15	1403	0.0387	0.0013	0.281982	0.000013	0.281948	1.9	0.5	1.80	2.05	−0.96
16	1466	0.0575	0.0019	0.282071	0.000016	0.282018	5.8	0.6	1.70	1.85	−0.94
17	1377	0.0339	0.0011	0.281986	0.000015	0.281957	1.6	0.5	1.79	2.05	−0.97
18	1414	0.035	0.0012	0.282061	0.000016	0.282029	5.0	0.6	1.69	1.86	−0.96
19	1383	0.0213	0.0007	0.281989	0.000014	0.281971	2.3	0.5	1.76	2.01	−0.98
20	1389	0.0525	0.0017	0.281978	0.000013	0.281933	1.1	0.5	1.83	2.09	−0.95
21	1394	0.0337	0.0012	0.282007	0.000014	0.281975	2.7	0.5	1.76	2.00	−0.96
22	1383	0.0344	0.0013	0.282026	0.000016	0.281992	3.0	0.6	1.74	1.97	−0.96
23	1397	0.0429	0.0015	0.281974	0.000013	0.281934	1.3	0.5	1.82	2.09	−0.95
24	1407	0.0277	0.001	0.281978	0.000012	0.281951	2.1	0.4	1.79	2.04	−0.97
25	1394	0.0471	0.0016	0.281966	0.000015	0.281924	0.8	0.5	1.84	2.11	−0.95

Hf 同位素组成,由于锆石极高的稳定性和封闭温度高,使得其 Lu-Hf 同位素体系较少受后期构造热事件的影响,即便在麻粒岩相等高级变质条件下,所测锆石的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值仍能很好反映其形成时体系的 Hf 同位素组成,甚至可记录岩浆源区不同源岩类型的特征(Scherer et al.,2001; Griffin et al.,2002; Wu Fuyuan et al.,2007)。因此,正的 ε_{Hf}(*t*) 值代表来自亏损幔源物质或新生地壳的部分熔融,负的 ε_{Hf}(*t*) 值指示来自于古老陆壳岩石源区外,如果存在较大变化范围的 ε_{Hf}(*t*),可揭示其源区不同性质源岩物质存在的信息(Kröner et al.,2012,2014)。本文片麻状花岗岩锆石具有较高的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值(0.281987~0.282258),依形成年龄计算获得的 ε_{Hf}(*t*) 值均为正值(+2~+11.1),在

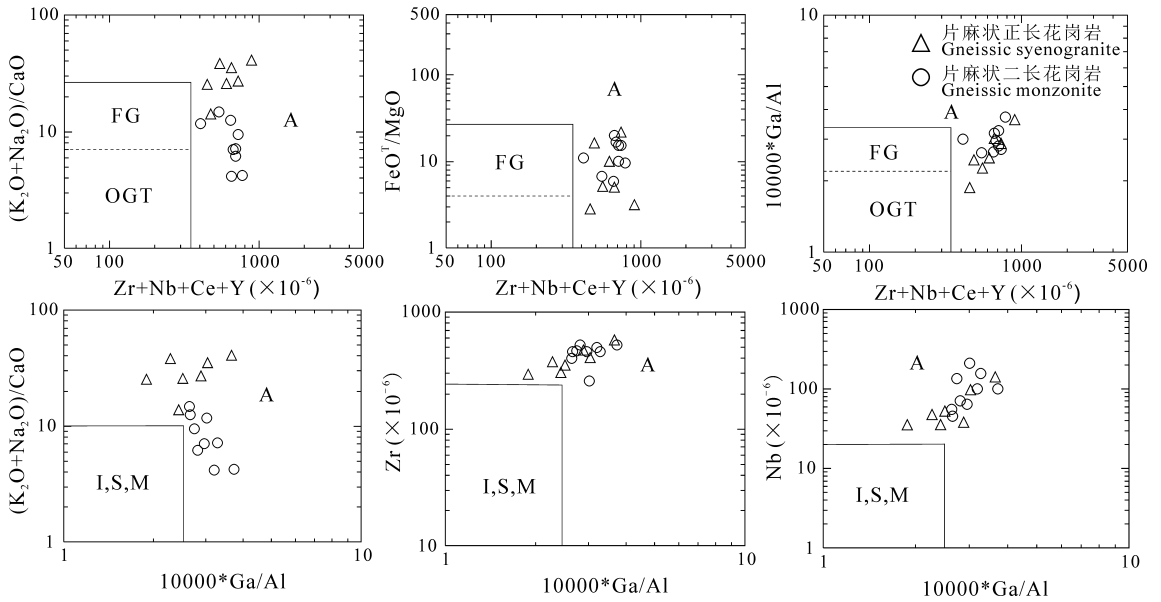


图 7 苏尼特左旗地区片麻状花岗岩的 A 型花岗岩判别图解(据 Whalen et al. ,1987)

Fig. 7 Discrimination diagrams of A-type granite of gneissic granites in the Sonid Left Banner area (after Whalen et al. ,1987)

OGT—未分异的 I 型、S 型、M 型和 A 型花岗岩;FG—高分异的 I 型花岗岩;A—A 型花岗岩

OGT—Unfractionated I-, S-, M-, and A-type granites; FG—fractionated I-type granites; A—A-type granites

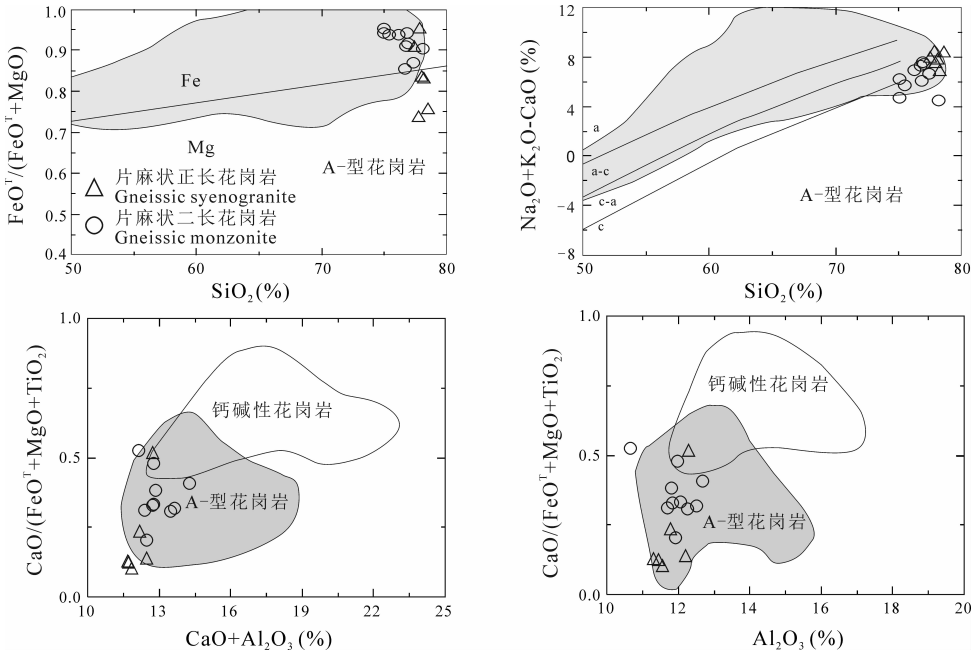


图 8 苏尼特左旗地区片麻状花岗岩全岩 SiO_2 与 $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ 和 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$ 图解(据 Frost and Frost, 2011)

及 $\text{CaO}/(\text{FeO}^T + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ 与 $(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 Al_2O_3 图解(据 Dall’Agnol and de Oliveira, 2007)

Fig. 8 Whole-rock SiO_2 vs. $\text{FeO}^T/(\text{FeO}^T + \text{MgO})$ and $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}$, $\text{CaO}/(\text{FeO}^T + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$

vs. $(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3)$ and Al_2O_3 diagrams showing the A-type affinities of the gneissic granites in the

Sonid Left Banner area (after Frost and Frost, 2011; Dall’Agnol and de Oliveira, 2007)

$t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解上所有测点均落在球粒陨石演化线与亏损地幔演化线之间区域(图 6), 其二阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2} = 1.8 \sim 2.04 \text{ Ga}$, 与 Nd 同位素结果一致, 也指示它们主要来自古元古代末期新生地壳物质的部

分熔融。然而, 部分锆石还出现了接近于亏损地幔演化线高的正值, 暗示与幔源岩浆活动相关。

4.3 大地构造意义

已有的研究表明 A 型花岗岩不仅形成于非造

山环境,也可以形成于造山作用后的伸展环境,包括地幔柱和板内裂谷等,造山后环境则包括弧后伸展和造山后伸展等(Whalen et al., 1987; Eby, 1992)。Eby(1992)将 A 型花岗岩划分为非造山与裂谷环境有关的 A₁ 型花岗岩和造山后构造环境形成的 A₂ 型花岗岩。在 A1-A2 分类判别图中(图 9),中元古代片麻状花岗岩类具有较高的 Ce/Nb、Y/Nb 和 Yb/Ta 比值,均落入 A₂ 区域,指示中元古代片麻状花岗岩类的形成构造背景与造山后伸展作用密切相关。在 Pearce (1984) 构筑的花岗岩 Ta-Yb 和 Rb-(Yb+Ta) 判别图解中落入与后碰撞花岗岩环境有关的区域(图 9)。尽管地球化学投图位于造山后环境,但岩石形成的构造背景还必须结合地质历史时期区域大地构造背景来确定。研究表明,中元古代(~1.4Ga)的岩浆活动在全球范围分布十分广泛,在欧洲芬诺斯坎迪亚(Fennoscandia)地区、北美洲大陆,包括加拿大以及美国的西南部等地区有一个广泛的以长英质为主的中元古代(1.3~

1.5Ga)岩浆活动带(Dickin et al., 1992; Ahall et al., 1998; Anderson et al., 1999; Corrigan et al., 2000; Blein et al., 2003),或称之为~1.4 Ga 的岩浆活动带,它沿着劳伦古陆(Laurentia)太古宙克拉通的外侧边缘地带分布(Nyman et al., 1994, Hu Aiqin et al., 2006)。~1.4 Ga 岩浆事件在中亚造山带中多个微陆块及周缘克拉通发育,如哈萨克斯坦板块(Konopelko et al., 2012);中天山地块(Hu Aiqin et al., 2006; Shi Wenxiang et al., 2010; He Zhenyu et al., 2015);锡林浩特地块(Sun Lixin et al., 2013);在中亚造山带周缘克拉通中,东欧板块也具有该时期构造岩浆记录,如 Sveco-Fennian, Trans-Scandinavian 和 Gothian 等构造带(Cawood et al., 2007; Kuznetsov et al., 2010);华北板块北缘也具有该时期构造热事件的记录(Yu Jianhua et al., 1990, 1996; Lu S N et al., 2002; Shao Ji'an et al., 2002, 2005),在高于庄组(Li Huaikun et al., 2012)和铁岭组斑脱岩夹层(Su Wenbo et al., 2013)

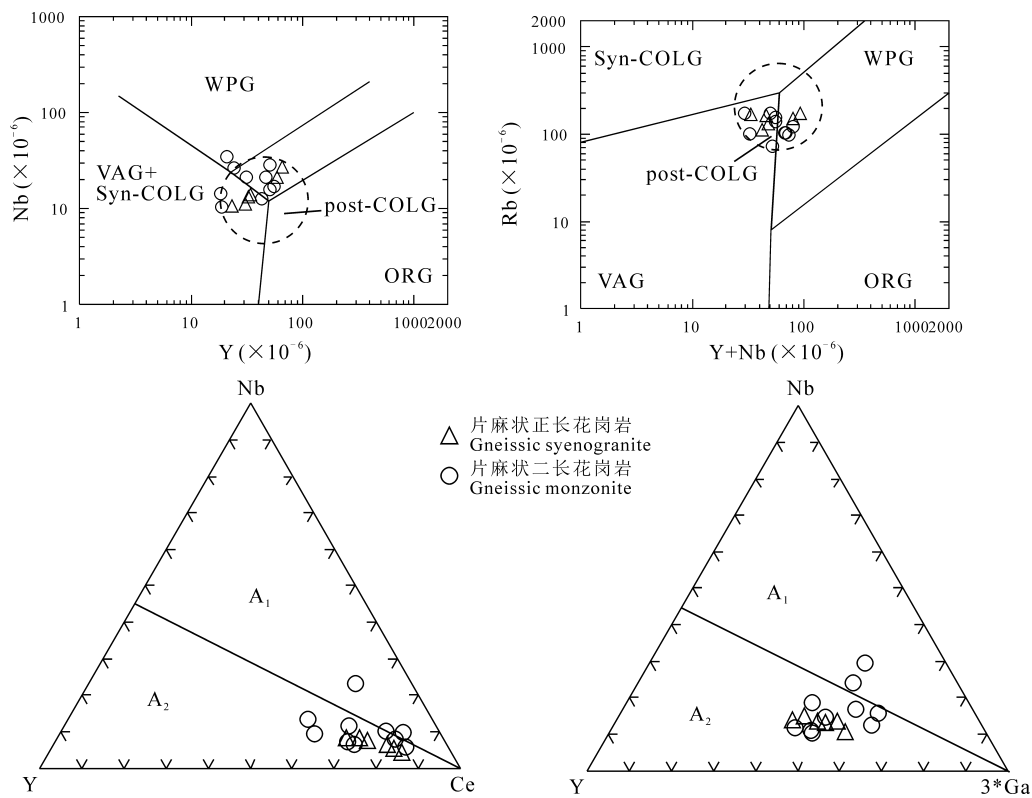


图 9 苏尼特左旗中元古代片麻状花岗岩的 Nb-Y 和 Rb-(Y+Nb) 图解(据 Pearce, 1984, 1986)及 A₁-A₂ 分类判别图(据 Eby, 1992)

Fig. 9 Diagrams of Nb-Y and Rb-(Y+Nb) (after Pearce, 1984, 1986) and A₁-A₂ classification discriminant (after Eby, 1992)

for the Mesoproterozoic gneissic granite in the Sonid Left Banner area

WPG—板内花岗岩;ORG—洋脊花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;syn-COLG/post-COLG—同碰撞/碰撞后花岗岩;

A₁ 型代表来源于幔源熔体的分离结晶;A₂ 型代表来源于地壳部分熔源区

WPG—Intraplate granite; ORG—ocean ridge granite; VAG—volcanic arc granite; syn-COLG/post-COLG—co-collisional/post-collisional granite;

A₁-type represents the isolated crystallization from the mantle source melt; A₂-Type represents the part of the source region derived from the crust

及下马岭组辉绿岩床(Li Huaikun et al., 2009; Zhang Shuanhong et al., 2012), 该期的岩浆事件被认为是 Columbia 超大陆中元古代裂解事件的响应(Zhai Mingguo et al., 2007, 2014)。

目前, 对中元古代 1.4 Ga 岩浆活动的构造环境有不同的认识: 一种认为 1.4 Ga 深成岩记录了板块边缘挤压作用的构造环境, 具有造山作用事件的岩浆活动和变质作用特征(Nyman et al., 1994); 另一种认为 1.4 Ga 的岩浆活动形成于非造山的构造环境, 由大规模的地幔上涌导致拉斑质下地壳的部分熔融形成(Frost et al., 1999; Barnes et al., 2002; Vigneresse, 2005)。近年来的研究表明 Columbia 超大陆的汇聚可能是在 2.1~1.8Ga 发生的全球性碰撞造山事件中完成, 而裂解可能开始于 1.6Ga, 结束于 1.3~1.2Ga, 但全球不同块体的裂解历史有较大的差异, 其间发生了大量的中元古代造山后-非造山阶段的非造山岩浆活动及镁铁质岩墙群的侵入(Zhao Taiping et al., 2004a, 2004b, 2007; Hou Guiting et al., 2008; Goldberg, 2010)。华北板块南北缘已发现的辉绿岩岩床(1.35Ga) (Zhang Shuanhong et al., 2009)、钾质斑脱岩(1.37Ga) (Su Wenbo et al., 2008)、正长岩(1.35Ga) 及 1.31Ga 的 A 型花岗岩和 1.3~1.2Ga 基性岩墙群(Hou Guiting et al., 2008)等, 此时华北克拉通处于大陆裂解时期。锡林浩特地块中元古代(~1.4Ga) A 型花岗岩与 Columbia 超大陆裂解时间相吻合, A 型花岗岩指示的伸展构造背景, 进一步说明中元古代中期整个华北克拉通和锡林浩特地块均处于大陆伸展构造环境。

5 结论

本文通过对中元古代片麻状花岗岩类进行岩相学、锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究, 得出以下主要结论:

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学结果显示中元古代片麻状花岗岩类形成于 1373~1400Ma。

(2) 中元古代片麻状花岗岩类具有高硅, 高碱(K_2O+Na_2O), 富铁, 贫镁, 钙和亏损 Ba、Sr、P、Ti 等特征。并具有较高的铝过饱和指数($ACNK=1.02\sim1.28$)、较高的 Ga/Al 比值和较明显的 Eu 负异常等特征, 表明岩石属于铝质 A 型花岗岩。

(3) Sr-Nd-Hf 同位素分析表明岩浆来源于新生地壳部分熔融, 揭示中元古代新生地壳的形成, 可能为幔源物质加入的结果。

(4) 锡林浩特地块中元古代(1.37~1.4Ga) A 型花岗岩是对哥伦比亚超大陆裂解事件的响应, 形成于伸展构造背景。

致谢: 感谢陆松年研究员在前寒武纪研究中的关心与指导, 感谢中国地质科学院地质研究所李锦轶研究员, 北京大学地球与空间科学学院徐备教授的支持和鼓励。同位素分析测试得到了天津地质调查中心实验室周红英主任、郝爽高级工程师、刘文刚工程师的大力帮助, 在此致以诚挚的谢意!

References

- Ahall K I, Connelly J. 1998. Intermittent 1.53~1.13 Ga magmatism in western Baltica: Age constraints and correlations within a postulated supercontinent. *Precambrian Research*, 92(1): 1~20.
- Anderson J L, Cullers R L. 1999. Paleo- and Mesoproterozoic granite plutonism of Colorado and Wyoming. *Rocky mt Geology*, 34(2): 149~164.
- Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 87~110.
- Barnes M A, Anthony E Y, Williams I, Asquith G B. 2002. Architecture of a 1.38~1.34 Ga granite-rhyolite complex as revealed by geochronology and isotopic and elemental geochemistry of subsurface samples from West Texas, USA. *Precambrian Research*, 119(1-4): 9~43.
- Bleil O, Lafleche M R, Corriveau L. 2003. Geochemistry of the granulitic Bondy gneiss complex: A 1.4 Ga arc in the central metasedimentary belt, Grenville Province, Canada. *Precambrian Research*, 120(3/4): 193~217.
- Blichert-Toft J, Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planetary Science Letters*, 148: 243~258.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97(1-2): 1~29.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region. 1991. *Regional Geology of Nei Mongol (Inner Mongolia) Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1~657 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region. 1996. *Lithostratigraphic Units of Inner Mongolia Autonomous Region*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~200 (in Chinese with English abstract).
- Cawood P A, Nemchin A A, Strachan R, Prave AR, Krabbendam M. 2007. Sedimentary basin and detrital zircon record along East Laurentia and Baltica during assembly and breakup of Rodinia. *Journal Geological Society, London*, 164: 257~275.
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173~174.
- Cheng Yuqi. 1994. *Introduction to Regional Geology in China*. Beijing: Geological Publishing House, 70~85 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Collins W J, Beam S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80:189~200.
- Corrigan D, Rivers T, Dunning G. 2000. U-Pb constraints for the plutonic and tectonometamorphic evolution of Lake Melville terrane, Labrador and implications for basement reworking in the north-eastern Grenville Province. *Precambrian Research*, 65(99): 1~2.
- Dall'Agnol R, de Oliveira D C. 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajas, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, 93: 215~233.
- Deng Qi, Wang Zhengjiang, Wang Jian, Cui Xiaozhuang, Ma Long, Xiong Xiaohui. 2017. Discovery of the Baiyu-1. 79 Ga A-type Granite in the Beiba area of the northwestern Marlin of Yangtze Block: Constraints on tectonic evolution of South China. *Acta Geologica Sinica*, 91(7):1454~1466 (in Chinese with English abstract).
- De Paolo D J. 1981. Neodymium isotope in the Colorado Front Range and implication for crust formation and mantle evolution in the Proterozoic. *Nature*, 291:189~202.
- Dickin A P, Higgins M D. 1992. Sm/Nd evidence for a major 1.5 Ga crush-forming event in the central Grenville Province. *Geology*, 20(2):137~140.
- Duan Zheng, Xing Guangfu, Yu Minggang, Zhao Xilin, Jin Guodong. 2017. The petrogenesis of Waibeishan aluminous A₁-type granite in Zhejiang Province: Constraints from mineralogy, zircon U-Pb dating, geochemistry and Hf isotope. *Acta Geologica Sinica*, 91(1):180~197 (in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1990. The A type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26:115~134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20:641~644.
- Frost C D, Frost B R. 2011. On ferroan (A-type) granitoids: Their compositional variability and modes of origin. *Journal of Petrology*, 52(1): 39~53.
- Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R, Edwards B R. 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: A reduced, rapakivi-type anorogenic granite. *Journal of Petrology*, 40(12): 1771~1802.
- Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, Zhou Hongying, Li Huimin. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10):1508~1513 (in Chinese with English abstract).
- Goldberg A S. 2010. Dyke swarms as indicators of major extensional events in the 1.9~1.2 Ga Columbia supercontinent. *Journal of Geodynamics*, 50(3-4): 176~190.
- Gordienko V. 1996. Correlation of Pre-Jurassic sections of ancient continents and microcontinents in east Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 13:215~221.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, O'Reilly S Y, van Acherberg E, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 133~147.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S, Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61:237~269.
- He Zhenyu, Sun Lixin, Mao Lingjuan, Zong Keqing, Zhang Zeming. 2015. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneiss and granodiorite from the southern Beisban orogenic collage: Mesoproterozoic magmatism and crustal growth. *China Science Bulletin*, 60(4): 389~399 (in Chinese with English abstract).
- He Zhenyu, Klemd R, Zhang Zeming, Zong Keqing, Sun Lixin, Tian Zuolin, Huang Botao. 2015. Mesoproterozoic continental arc magmatism and crustal growth in the eastern Central Tianshan arc terrane of the southern Central Asian orogenic belt: Geochronological and geochemical evidence. *Lithos*, 236~237, 74~89.
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, Jin Manyuan. 1995. Tectonic setting classifications and discrimination criteria for alkaline granites. *Science in China (B)*, 25(4):418~426 (in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, Jin Manyuan. 1996. Post-orogenic alkaline granites from China and comparisons with anorogenic alkaline granites elsewhere. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13:13~27.
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, Zhang Jisheng, Wang Tao. 2003. Correlation between continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the granites with positive ϵ_{Nd} in the central Asian orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(2):203~209 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Santosh M, Qian Xianglin, Lister G S, Li Jianghai. 2008. Tectonic constraints on 1.3~1.2 Ga final breakup of Columbia supercontinent from a giant radiating dyke swarm. *Gondwana Research*, 14(3): 561~566.
- Hu Aiqin, Wei Gangjian, Deng Wenfeng, Zhang Jibin, Chen Linli. 2006. 1.4 Ga SHRIMP U-Pb age for zircons of granodiorite and its geological significance from the eastern segment of the Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Geochimica*, 35(4): 333~345 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shouxi, Gu Lianxing, Yan Zhenfu, Hu Zhihane, Guo Jichun, Li Haizhang, Sun Yiedong. 1991. Relationship of various types of granites with plate tectonics and their genesis and distribution regularity. *Contributions on Granitoids and Their Mineralogenesis in Northern China*. Beijing: Geological Publishing House, 33~39 (in Chinese).
- Jahn Boming, Griffin W L, Windley B F. 2000. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. *Tectonophysics*, 328: 1~227.
- Jahn Boming, Windley B F, Natal' in B, Dobretsov N. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23:599~815.

- Khain E V, Bibikova E V, Kröner A, Zhuravlev D Z, Sklyarov E V, Fedotova A A, Kravchenko-Berezhnoy I R. 2002. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur complex, eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. *Earth Planetary Science Letters*, 199:311~325.
- Khain E V, Bibikova E V, Salnikova E B. 2003. The Palaeo-Asian Ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: New geochronologic data and palaeotectonic reconstructions. *Precambrian Research*, 122:329~358.
- King P L, White A J R, Chappell B W, Allen L M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia. *Petrology*, 38: 371~391.
- Konopelko D, Kullerud K, Apayarov F, Sakiev K, Baruleva O, Ravan E, Lepekina E. 2012. SHRIMP zircon chronology of HP-UHP rocks of the Makbal metamorphic complex in the northern Tien Shan, Kyrgyzstan. *Gondwana Research*, 22: 300~309.
- Kozmichev A B, Bibikova E V, Zhuravlev D Z. 2001. Neoproterozoic (800 Ma) orogeny in the Tuva-Mongolia Massif (Siberia): Island arc-continent collision at the northeast Rodinia margin. *Precambrian Research*, 110:109~126.
- Kröner A, Alexeiev D V, Hegner E, Rojas-Agramonte Y, Corsini M, Chao F Y, Wongg J, Windley B F, Liu B D, Tretyakov A A. 2012. Zircon and muscovite ages, geochemistry, and Nd-Hf isotopes for the Aktyuz metamorphic terrane: Evidence for an Early Ordovician collisional belt in the northern Tianshan of Kyrgyzstan. *Gondwana Research*, 21(4): 901~927.
- Kröner A, Kovach V, Belousova E, Hegner E, Armstrong R, Dolgoplova A, Seltmann R, Alexeiev D V, Hoffmann J E, Wong J, Sun Min, Cai Keda, Wang Tao, Tong Ying, Wilde S A, Degtyarev K E, Rytisk E. 2014. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian orogenic belt. *Gondwana Research*, 25: 103~125.
- Kuznetsov L M, Natapov E, Belousova A, O'Reilly S Y, Griffin W L. 2010. Geochronological, geochemical and isotopic study of detrital zircon suites from late Neoproterozoic clastic strata along the NE margin of the East European Craton: Implications for plate tectonic models. *Gondwana Research*, 17: 583~601.
- Li Huaikun, Lu Songnian, Li Huimin, Sun Lixin, Xiang Zhenqun, Geng Jianzhen, Zhou Hongying. 2009. The geological significance of 1320Ma basic rockbed in the North China craton. *Geological Bulletin of China*, 28(10):1396~1404 (in Chinese with English abstract).
- Li Shujing, Gao Dezhen. 1995. New discoveries of geological structures in Sonid Zuoqi of Inner Mongolia and discussion on tectonic features. *Geoscience*, (2):130~141.
- Li Shujing, ZhangWeijie, Geng Mingshan. 1998. An Overview of the Geological Structural Characteristics and Formation and Evolution of the Mongolian Arc. Beijing: Geological Publishing House, 1~145 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 2006. Permian geodynamic setting of northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3-4): 207~224.
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, Wang Rucheng, Hu Huan. 2003. Subdivision criteria and discrimination genesis for A-type rock suites. *Geological Journal of China Universities*, 9 (4): 573~591 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qi, Zhang Fuqin, Shi Yurui, Shi Guanghai, Zhang Lvqiao, Tao Hua. 2003. SHRIMP dating of Adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic Subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77 (3):317~327 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2):537~571.
- Liu Zhenghong, Liu Yaqin, Feng Benzhi. 2000. The establishment and tectonic evolution of Proterozoic orogenic belt in the north margin of north China plate. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(2):110~114 (in Chinese with English abstract).
- Lorselle M C, Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological Society of America*, 11:468.
- Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huikun, Chen Zhihong. 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton. *Gondwana Research*, 5:123~131.
- Lu Songnian, Li Huimin. 1991. A precise U-Pb single zircon age determination for the volcanics of Dahongyu Formation Changcheng system in Jixian. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 22: 137~146 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User manual for Isoplot-EX Version3. 0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Special Publication Vo. 2. Berkeley, California, USA: Berkeley Geochronology Center, 1~70.
- Nyman M W, Karlstrom K E, Kirby E, Graubard C M. 1994. Mesoproterozoic contractional orogeny in western North America: Evidence from ca. 1.4 Ga plutons. *Geology*, 22(10): 901~904.
- Picher W S. 1983. *GraniteType and Tectonic Environment, Mountain Building Processes*. London: Academic Press, 19~40.
- Pisarevsky S A, Natapov L M. 2003. Siberia and Rodinia. *Tectonophysics*, 375:221~245.
- Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Binwei, Jiang Chunfa, Niu Baogui, Li Jinyi, Xie Guanglian, He Zhengjun, Liu Zhigang. 1999. The Tectonics of China from a GlobalView—A Guide to the Tectonic Maps of China and Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House, 1~32 (in Chinese with English abstract).
- Rojas Agramonte Y, Kröner A, Demoux A, Xia X, Wang W, Donskaya T, Liu Dunyi, Sun Min. 2011. Detrital and

- xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia; Significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian orogenic belt. *Gondwana Research*, 19:751~763.
- Scherer E, Munker C, Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 293: 683~687.
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299~307.
- Shao Ji'an. 1991. Crust Evolution in the Middle Part of the Northern Margin of Sino-Korean Plate. Beijing: Peking University Publishing House, 1~200 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhang Luqiao. 1990. Ancient terranes in the Hinganling-Mongolia orogenic belt. *Orogenic Belt, Basin, Pacific Tectonic. International Continental Lithosphere Tectonic Evolution and Dynamics Symposium The 3rd National Tectonic Conference Proceedings 1*. Beijing: Geological Publishing House, 16~21 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhang Luqiao, Li Daming. 2002. Three Proterozoic extensional events in North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2):152~160 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhai Mingguo, Zhang Luqiao, Li Darning. 2005. Identification of 5 time-groups of dike swarms in Shanxi-Hebei Inner Mongolia border area and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 56~67 (in Chinese with English abstract).
- Shi Wenxiang, Liao Qunan, Hu Yuanqing, Yang Zaifeng. 2010. Characteristics of Mesoproterozoic granites and their geological significances from Middle Tianshan Block, East Tianshan district, NW China. *Geological Science Technology Information*, 29: 29~37 (in Chinese with English abstract).
- Su Wenbo, Zhang Shihong, Huff W D, Li Huaikun, Ettensohn F R, Chen X Y, Yang H M, Han Yugui, Song Biao, Santosh M. 2008. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation; Implications for revised subdivision of the Meso- to Neoproterozoic history of the North China Craton. *Gondwana Research*, 14(3): 543~553.
- Sun Lixin, Ren Bangfang, Zhao Fengqing, Gu Yongchang, Li Yanfeng, Liu Hui. 2013. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of the Mesoproterozoic granitic gneiss in Xilinhot Block, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 32(2/3): 327~340 (in Chinese with English abstract).
- Vigneresse J L. 2005. The specific case of the Mid-Proterozoic rapakivi granites and associated aureoles within the context of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 137(1/2): 1~34.
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effect in a variety of crustal magmas types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64: 295~304.
- Whalen J B W, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95:407~419.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Lin Qiang. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181~189 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyun, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Rongge, Sui Decai, Luo Zhaohua, Zhang Weijie, Li Shujing. 1995. Discovery of early Proterozoic metamorphic complex in north Inner Mongolia. *Geoscience*, (2): 142~148 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, Zhai Mingguo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1069~1078.
- Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qinzong, Zhou Yongheng, Wang Yanyang, Luo Zhiwen. 2014. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng orogenic belt (XMOB). *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1841~1857 (in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Xu Yan, Li Jin, Li Qunsheng. 2016. Age of the Ondor Sum Group in western Inner Mongolia and its position in the Central Asia orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 120~127 (in Chinese with English abstract).
- Xu Bowen, Xi Aihua, Ge Yuhui, Liu Jue, Wang Mingzhi, Fang Chao. 2015. Zircon U-Pb ages of the Late Paleozoic A-Type granites in Chifeng Inner Mongolia and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 58~69 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jianhua, Fu Huiqin, Zhang Fenglan, et al. 1996. The Nonorogenic Rapakivi Granite and Related Rocks in North Margin of North China Platform. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1~182 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic in the North China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665~2682 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Hu Bo, Peng Peng, Zhao Taiping. 2014. Mesoproterozoic magmatic events and multistage rifting in the NCC. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 100~119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Li Chengdong. 2012. Granites: Implications for Continental Geodynamics. Beijing: China Ocean Press, 1~80 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Yang Zhenyu, He Zhefeng, Wu Hai. 2009. The 1.35 Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(3-4): 588~600.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Santosh M. 2012. Mid-Mesoproterozoic bimodal magmatic rocks in the northern North China Craton: Implications for magmatism related to breakup of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 222~223: 339~367.

- Zhao Taiping, Chen Fukun, Zhai Mingguo, Xia Bin. 2004a. Single zircon U-Pb ages and their geological significance of the Damiao anorthosite complex, Hebei Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3):685~690 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Zhai Mingguo, Xia Bin, Li Huimin, Zhang Yixing, Wan Yusheng. 2004b. Study on the zircon SHRIMP ages of the Xiong'er Group volcanic rocks: Constraint on the starting time of covering strata in the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 49(22):2342~2349 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Xu Yonghang, Zhai Mingguo. 2007. Petrogenesis and tectonic setting of the Paleoproterozoic Xiong'er Group in the southern part of the North China Craton: A review. *Geological Journal of China Universities*, 13(2):191~206 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 程裕淇. 1994. 中国区域地质概论. 北京:地质出版社, 70~85.
- 邓奇,汪正江,王剑,崔晓庄,马龙,熊小辉. 2017. 扬子地块西北缘碑坝地区白玉~1.79 Ga A-型花岗岩的发现及其对构造演化的制约. *地质学报*, 91(7):1454~1466.
- 段政,邢光福,余明刚,赵希林,靳国栋. 2017. 浙江外北山铝质 A₁ 型花岗岩成因:矿物学、年代学、地球化学及 Hf 同位素制约. *地质学报*, 91(1):180~197.
- 耿建珍,李怀坤,张健,周红英,李惠比. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. *地质通报*, 30(10):1508~1513.
- 贺振宇,孙立新,毛玲娟,宗克清,张泽明. 2015. 北山造山带南部片麻岩和花岗岩闪长岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素:中元古代的岩浆作用与地壳生长. *科学通报*, 60(4):389~399.
- 洪大卫,王世洸,韩宝福,靳满元. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志. *中国科学(B辑)*, 25(4):418~426.
- 洪大卫,王世洸,谢锡林,张季生,王涛. 2003. 从中亚正 ϵ_{Nd} 值花岗岩看超大陆演化和大陆地壳生长的关系. *地质学报*, 77(2):203~209.
- 胡霭琴,韦刚健,邓文峰,张积斌,陈林丽. 2006. 天山东段 1.4Ga 花岗闪长质片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球化学*, 35(4):333~345.
- 胡受奚,顾连兴,严正富,胡志宏,郭继春,李海章,孙冶东. 1991. 不同类型花岗岩与板块构造的关系及其形成和分布规律. *中国北方花岗岩与成矿作用论文集*. 北京:地质出版社,33~39.
- 李怀坤,陆松年,李惠民,孙立新,相振群,耿建珍,周红英. 2009. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约. *地质通报*, 28(10):1396~1404.
- 李述靖,高德臻. 1995. 内蒙古苏尼特左旗地区若干地质构造新发现及其构造属性的初步探讨. *现代地质*, (2):130~141.
- 李述靖,张维杰,耿明山. 1998. 蒙古弧地质构造特征及形成演化概论. 北京:地质出版社, 1~145.
- 李献华,刘颖,杨岳衡,陈福坤,涂湘林,祁昌实. 2007. 同一岩石试样的 Lu-Hf 和 Sm-Nd 快速分离及国家岩石标准物质的 Hf-Nd 同位素比值精确测定. *岩石学报*, 23: 221~226.
- 刘昌实,陈小明,陈培荣,王汝成,胡欢. 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因. *高校地质学报*, 9(4):573~592.
- 刘敦一,简平,张旗,张福勤,石玉若,施光海,张履桥,陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年:早古生代洋壳消减的证据. *地质学报*, 77(3):317~327.
- 刘正宏,刘雅琴,冯本智. 2000. 华北板块北缘中元古代造山带的确立及其构造演化. *长春科技大学学报*, 30(2):110~114.
- 陆松年,李惠民. 1991. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年. *中国地质科学院院报*, 22: 137~146.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京:地质出版社,1~657.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1996. 内蒙古自治区岩石地层. 武汉:中国地质大学出版社,1~200.
- 任继舜,王作勋,陈炳蔚,姜春发,牛宝贵,李锦轶,谢广连,和政军,刘志刚. 1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明. 北京:地质出版社,1~32.
- 邵济安,张履桥. 1990. 兴蒙造山带中的古地体.《造山带·盆地·环太平洋构造》国际大陆岩石圈构造演化与动力学讨论会第三届全国构造会议论文集 1. 北京:地质出版社, 16~21.
- 邵济安,张履桥,李大明. 2002. 华北克拉通元古代的三次伸展事件. *岩石学报*, 18(2): 152~160.
- 邵济安,翟明国,张履桥,李大明. 2005. 晋冀蒙交界地区五期岩墙群的界定及构造意义. *地质学报*, 79(1):56~67.
- 施文翔,廖群安,胡远清,杨再峰. 2010. 东天山地区中天山地块内中元古代花岗岩的特征及地质意义. *地质科技情报*, 29: 29~37.
- 孙立新,任邦方,赵凤清,谷永昌,李艳峰,刘卉. 2013. 内蒙古锡林浩特地块中元古代花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征. *地质通报*, 32(2-3):327~340.
- 吴福元,孙德有,林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. *岩石学报*, 15(2):181~189.
- 吴福元,李献华,郑永飞,高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2):185~220.
- 肖荣阁,隋德才,罗照华,张维杰,李述靖. 1995. 内蒙古北部早元古代变质岩系的发现及其岩石学研究. *现代地质*, (2): 142~148.
- 徐备,赵盼,鲍庆中,周永恒,王炎阳,罗志文. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探. *岩石学报*, 30(7):1841~1857.
- 徐备,徐严,栗进,李群生. 2016. 内蒙古西部温都尔庙群的时代及其在中亚造山带中的位置. *地学前缘*, 23(6):102~127.
- 徐博文,郝爱华,葛玉辉,刘压,王明智,房超. 2015. 内蒙古赤峰地区晚古生代 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义. *地质学报*, 89(1):58~69.
- 郁建华. 1990. 北京及附近元古宙裂谷槽中球斑花岗岩套的地球化学. *地质学报*, 64(4):322~336.
- 郁建华,傅会芹,张凤兰,等. 1996. 华北地台北部非造山环斑花岗岩及有关岩石. 北京:中国科学技术出版社, 1~182.
- 翟明国,彭澎. 2007. 华北克拉通元古代构造事件. *岩石学报*, 23(11):2665~2682.
- 翟明国,胡波,彭澎,赵太平. 2014. 华北中一新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件. *地学前缘*, 21(1):100~119.
- 张旗,李承东. 2012. 花岗岩:地球动力学意义. 北京:海洋出版社, 1~80.
- 赵太平,陈福坤,翟明国,夏斌. 2004a. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 20(3):685~690.
- 赵太平,翟明国,夏斌,李惠民,张毅星,万渝生. 2004b. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究——对华北克拉通盖层初始时间的制约. *科学通报*, 49(22):2342~2349.
- 赵太平,徐勇航,翟明国. 2007. 华北陆块南部元古宙熊耳群火山岩

的成因与构造环境:事实与争议. 高校地质学报, 13(2):191 ~206.

Petrogenesis of the Mesoproterozoic Gneissic Granite in the Sonid Left Banner Area, Inner Mongolia, and Its Tectonic Implications

SUN Lixin, REN Bangfang, WANG Shuqing, XU Xinying, ZHANG Yun
Tianjin Center of Geological Survey, CGS, Tianjin, 300170

Abstract

Xilinhote Block is located in the middle segment of the Xing-Meng Orogen in Inner Mongolia. Precambrian rocks in the block consists of Baoyintu Group and gneissic granite. Discovery of ~1.4 Ga Mesoproterozoic granitic rocks provides evidence for existence of the Xilinhote Block, but its petrogenesis and tectonic implication are still unclear. Mesoproterozoic granitic rocks in the Sonid Left Banner area consist mainly of yengranite and monzogranite. And zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for four samples yields ages of 1373 ± 7 Ma and 1399 ± 11 Ma, respectively, suggesting middle Mesoproterozoic in age. The gneissic granitoids are characterized by high SiO₂ and alkali, with K₂O/Na₂O>1 and peraluminous, high total REE content with enrichment of LREE rather than HREE, and distinct negative Eu anomaly. All these features indicate that they belong to A₂-type granite. The in-situ zircon Hf isotopic analysis shows depleted compositions with (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i ratios varying from 0.281924 to 0.282288, ε_{Hf}(*t*) values from +0.8 to +11 and two stage Hf model ages (*T*_{DM2}) from 1.45 to 2.17 Ga. Generally depleted isotopic composition and whole rock ε_{Nd}(*t*) of (+0.3~+1.0) except one sample with a value of -0.2 suggest that the gneissic granitoids were the product of partial melting of accretion crust in the end of the Paleoproterozoic (1.88~1.97 Ga). Regionally extensive occurrence of 1.4 Ga potassic granitoids displays occurrence of a tectonic-magmatic event triggered by crustal extension, which was response to breakup of Colombia supercontinent. 1.4 Ga A-type granitoids in the Xilinhote block indicate that the Xilinhote Block and North China Craton in the Mesoproterozoic both were in a tectonic setting of continental extension.

Key words: Mesoproterozoic; A-type granite; regional extension; Sonid Left Banner