

鞍山地区铁架山花岗岩中表壳岩的碎屑锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义

殷小艳^{1,2}, 万渝生^{1,2}, 刘敦一^{1,2}, Simon A Wilde³, 周红英^{1,2}, 伍家善¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京离子探针中心, 北京 100037;
3. 西澳柯廷大学地质系, 珀斯 6845, 澳大利亚)

摘要: 鞍山地区 3.0 Ga 铁架山花岗岩是华北克拉通时代最古老、分布范围最大的钾质花岗岩, 其中存在较多成熟度高的变泥沙质岩石表壳岩, 其元素和 Nd 同位素组成与铁架山花岗岩十分相似。以往研究把它们作为铁架山花岗岩中的表壳岩包体, 认为铁架山花岗岩形成于它们的部分熔融。本文利用碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年方法对鞍山铁架山花岗岩中变泥沙质表壳岩的形成时代进行了制约, 证实表壳岩形成于铁架山花岗岩之后, 为遭受强烈变质变形地区变泥沙质岩石时代研究提供了一个新的实例。

关键词: SHRIMP; 碎屑锆石; 表壳岩; 花岗岩; 太古宙; 鞍山

中图分类号: P597+.3; P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)04-0282-05

Formation time of supracrustal rocks in Tiejiaoshan granite of the Anshan area: evidence from detrital zircon SHRIMP dating

YIN Xiao-yan^{1,2}, WAN Yu-sheng^{1,2}, LIU Dun-yi^{1,2}, Simon A Wilde³,
ZHOU Hong-ying^{1,2} and WU Jia-shan¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Beijing SHRIMP Centre, Beijing 100037, China; 3. Department of Applied Geology, Curtin University of Technology, Perth 6845, Australia)

Abstract: The 3.0 Ga Tiejiaoshan granite in the Anshan area is the oldest and largest potassium granite intrusion in the North China Craton. Meta-sedimentary rocks with high maturity in the Tiejiaoshan granite were once considered to occur as enclaves and to be a main resource from which the Tiejiaoshan granite came. However, SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons from three meta-sedimentary samples commonly gives the ages of ~3.0 Ga, being the same as the formation time of the Tiejiaoshan granite. Therefore, the supracrustal rocks should have been formed after 3.0 Ga, with a tectonic relationship with the granite. It is considered that the supracrustal rocks dated in this study are a part of the 2.5 Ga Anshan Group.

Key words: SHRIMP; detrital zircon; supracrustal rock; granite; Archaean; Anshan

近年来,碎屑锆石年龄分布模式研究取得了重要的进展。该方法在确定(变质)碎屑沉积岩的物质来源、沉积时代和形成构造环境等方面,具有其他方

法不可替代的长处(Geslin *et al.*, 1997; Cawood *et al.*, 2000; 万渝生等, 2003)。鞍山地区 3.0 Ga 铁架山花岗岩是华北克拉通最古老、分布范围最大的钾

收稿日期: 2005-11-11; 修订日期: 2006-04-29

基金项目: 国土资源部地质调查项目(1212010561608)

作者简介: 殷小艳(1981-), 女, 硕士, 地球化学专业; 通讯作者: 万渝生(1958-), 男, 博士, 研究员, 从事同位素年代学和地球化学研究, E-mail: wanyusheng@bjshrmp.cn。

质花岗岩,其中存在较多成熟度高的变泥沙质岩石表壳岩,其元素和 Nd 同位素组成与铁架山花岗岩十分相似。以往研究将其作为铁架山花岗岩中的表壳岩包体,认为铁架山花岗岩形成于它们的部分熔融(万渝生等 2002)。本文利用碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年对铁架山花岗岩中变泥沙质表壳岩的形成时代进行了制约,为遭受强烈变质变形地区变泥沙质岩石时代研究提供了一个新的实例。

1 地质及岩相学

铁架山岩体分布于鞍山市区东南铁架山及附近中低山地,其中存在较多不同类型的表壳岩,主要分布于铁架山南坡,一般呈北西向分布(万渝生等, 2002)(图 1)。表壳岩以变泥沙质岩石为主,也有变质石英岩、片麻岩和斜长角闪岩等,普遍遭受强烈糜棱岩化作用。它们规模不大,通常只有十几厘米到几米长,最大者也不过百余米长。空间上,可见不同类型岩石互层产出。成熟度高的变泥沙质岩石构成其主体。由于第四系覆盖,它们与铁架山花岗岩的直接接触关系较难见到。在可以见到的地方,均为

整合接触,即花岗岩和表壳岩的接触面、花岗岩片麻理、表壳岩片麻理(或片理)相互平行。本次测年的 3 个样品简要描述如下:

云母石英片岩(A0435) 位于铁架山山顶。岩石呈灰色,片状构造。主要由石英、白云母、黑云母组成,不同矿物含量有一定变化。石英以两种形式存在,一类与白云母共生,粒度较细小;另一类呈条带状集合体,矿物粒度较粗,可具三连点结构。白云母为集合体或与细粒石英共生。黑云母小片状,浅黄-浅黄绿多色性。见面理置换现象。

变质石英岩(A0436) 位于铁架山南坡,与条带状含磁石英岩共生。岩石呈层状,层厚一米余。岩石含少量杂质矿物。石英具三连点结构,已重结晶。与贫磁铁矿石英岩类似,难以确定其变质原岩为碎屑沉积或化学沉积。但碎屑锆石存在(见下文)表明石英岩为碎屑沉积产物。

黑云变粒岩-片麻岩(A9819) 位于铁架山山顶。岩石主要由斜长石、石英、黑云母组成,按结构构造也可划分为 4 个组成部分:细粒长石、石英集合体,以斜长石为主;条带状石英集合体,石英粒度较粗,具三连点结构;大片状黑云母,浅黄-黄色多色



图 1 鞍山地区地质简图[据万渝生等(2002)略作修改]及本文样品位置

Fig. 1 Geological map of the Anshan area(after Wan Yusheng et al., 2002) showing locations of samples studied in this paper

性,可斜交面理,似形成在后,长石碎斑,存在旋转现象。岩石也遭受过强烈糜棱岩化作用。它与浅粒岩的主要差异在于云母的类型和含量不同。

2 测年技术

锆石年龄测定在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成,测定原理和方法见 Williams(1998)。一次离子流强度 5 nA,一次离子流束斑大小 25~30 μm ,每个数据点测定由 3~5 次扫描构成。标样为 SL13(年龄和 U 含量分别为 572 Ma 和 238 $\mu\text{g/g}$)和 TEM(年龄为 417 Ma)(Williams, 1998; Black *et al.*, 2003),分别用于 U 含量和年龄校正。用实测 ^{204}Pb 进行普通铅年龄校正。年龄误差为 1σ 。

3 测年结果

3.1 云母石英片岩(A0435)

锆石呈柱状,具良好晶形,无明显的磨圆现象。阴极发光图像中锆石具密集的岩浆环带(图 2a)。部分锆石边部似存在窄的变质增生边。对 20 颗锆石 20 个数据点分析, U、Th 含量和 Th/U 比值分别为 $306 \times 10^{-6} \sim 1\,230 \times 10^{-6}$ 、 $143 \times 10^{-6} \sim 1\,172 \times 10^{-6}$ 和 0.15~1.48(表 1)。锆石普遍存在强烈铅丢失,数据点 11.1 位于谐和线上, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,959 \pm 6$ Ma。锆石虽存在铅丢失,但 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变小,大致位于同一不一致线上(图 3a)。部分数据点给出更年轻的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,但强烈的铅丢失难以确定其形成真实年龄。所有测定锆石年龄都等于或小于 3.0 Ga。数据点 7.1 接近谐和线(图 3a), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,888 \pm 7$ Ma。

3.2 变质石英岩(A0436)

锆石形态与云母石英片岩(A0435)的类似(图 2b),但粒度通常更大。对 20 颗锆石 20 个数据点分析, U、Th 含量和 Th/U 比值分别为 $42 \times 10^{-6} \sim 1\,115 \times 10^{-6}$ 、 $26 \times 10^{-6} \sim 1\,682 \times 10^{-6}$ 和 0.22~1.56(表 1)。锆石存在强烈铅丢失,仅数据点 19.1 位于谐和线上(图 3b), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,981 \pm 9$ Ma。存在铅丢失的数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄普遍变小,但大致位于同一不一致线上。大多数锆石都约形成于 3.0 Ga,代表了物源区岩石形成时代。

3.3 黑云变粒岩—片麻岩(A9819)

空间上样品与云母石英片岩(A0435)相邻,锆

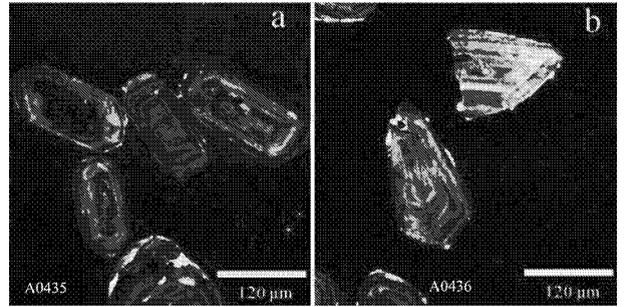


图 2 锆石阴极发光图像

Fig. 2 cathodoluminescence images of zircons
(a)—云母石英片岩(A0435)(b)—变质石英岩(A0436)
(a)—mica quartz schist(A0435)(b)—quartzite(A0436)

石特征与之也相似。对 12 颗锆石 13 个数据点分析除 6.1 外,其余 12 个数据点的 U、Th 含量和 Th/U 比值分别为 $228 \times 10^{-6} \sim 1\,982 \times 10^{-6}$ 、 $288 \sim 932 \times 10^{-6}$ 和 0.35~1.31(表 1)。锆石存在强烈铅丢失,仅数据点 10.1 位于谐和线上(图 3c), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $2\,975 \pm 9$ Ma。其余发生铅丢失的数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变小,大多数锆石都约形成于 3.0 Ga,代表了物源区岩石形成时代。

4 讨论和结论

根据矿物组合、结构构造和地球化学组成特征,铁架山花岗岩中的表壳岩可大致划分为两类。一类包括云母石英片岩、变粒岩、浅粒岩和石英岩,局部可见它们与铁架山花岗岩直接接触,以往把它们作为铁架山花岗岩中的表壳岩包体。尽管遭受强烈变质变形,原岩为陆源碎屑沉积成因的性质仍十分清楚。变泥沙质岩石以 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, 出现明显负钕、负钡异常为特征, Nd 同位素亏损地幔模式年龄 (t_{DM}) 为 3.36~3.51 Ga(万渝生等, 2002)。显然,变质原岩是古老陆壳物质再循环产物,具有高的成熟度和长的地壳滞留时间。由于铁架山花岗岩在元素和 Nd 同位素组成上与变泥沙质岩石十分类似,以往认为两者有物源上的成因联系,铁架山花岗岩是它们部分熔融的产物(万渝生等, 2002)。但是,本次研究对黑云变粒岩、云母石英片岩和变质石英岩等 3 个样品碎屑锆石测年,其年龄大都为 3.0 Ga 左右,代表了碎屑物质物源区的形成时代。碎屑锆石年龄与铁架山花岗岩形成时代(3.0 Ga)一致,显然,这些泥沙质岩石形成于铁架山花岗岩之后,排除了它们为铁架山花岗岩中包体的可能。它们以“包体”

表 1 铁架山花岗岩中表壳岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

Table 1 SHRIMP U-Pb dating of zircons from the supracrustal rocks in the Tiejiashan granite in the Anshan area

数据点	²⁰⁶ Pb _c /%	U	Th	²⁰⁶ Pb* ε _{Pb} /10 ⁻⁶	²³² Th / ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	± %	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	± %	err corr	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		不谐和 性/%
													年龄/Ma	±	年龄/Ma	±	
A0435-1.1	0.05	930	1 172	326	1.30	0.178 40	0.43	10.04	2.6	0.408	2.6	0.986	2 207 ± 48	2 638 ± 7	16		
A0435-2.1	0.00	722	833	247	1.19	0.192 8	0.82	10.60	2.7	0.399	2.6	0.953	2 163 ± 47	2 767 ± 13	22		
A0435-3.1	0.01	466	611	210	1.35	0.214 83	0.46	15.57	2.6	0.526	2.6	0.984	2 723 ± 57	2 942 ± 8	7		
A0435-4.1	0.03	1 230	748	301	0.63	0.155 1	3.0	6.09	3.9	0.284 9	2.5	0.652	1 616 ± 36	2 403 ± 50	33		
A0435-5.1	0.03	779	399	291	0.53	0.201 26	0.42	12.07	2.6	0.435	2.6	0.987	2 328 ± 50	2 836 ± 7	18		
A0435-6.1	0.03	853	917	291	1.11	0.190 28	0.51	10.40	2.6	0.396	2.5	0.980	2 153 ± 46	2 745 ± 8	22		
A0435-7.1	0.04	483	674	227	1.44	0.207 69	0.44	15.65	2.6	0.547	2.6	0.986	2 811 ± 59	2 888 ± 7	3		
A0435-8.1	0.01	864	861	285	1.03	0.188 69	0.39	9.97	2.6	0.383 3	2.5	0.988	2 092 ± 45	2 731 ± 6	23		
A0435-9.1	0.05	827	1 008	274	1.26	0.189 56	0.42	10.07	2.6	0.385 2	2.5	0.987	2 101 ± 45	2 738 ± 7	23		
A0435-10.1	0.01	827	359	312	0.45	0.183 48	0.43	11.11	2.6	0.439	2.6	0.986	2 348 ± 50	2 685 ± 7	13		
A0435-11.1	0.03	306	428	152	1.45	0.217 03	0.37	17.34	2.6	0.579	2.6	0.989	2 946 ± 60	2 959 ± 6	0		
A0435-12.1	0.05	745	712	246	0.99	0.190 67	0.46	10.10	2.6	0.384 3	2.5	0.984	2 096 ± 45	2 748 ± 8	24		
A0435-13.1	0.04	750	896	238	1.23	0.200 2	1.1	10.18	2.8	0.368 6	2.6	0.917	2 023 ± 44	2 828 ± 18	28		
A0435-14.1	0.00	1 007	143	330	0.15	0.195 65	0.36	10.29	2.6	0.381 6	2.5	0.990	2 084 ± 45	2 790 ± 6	25		
A0435-15.1	0.03	609	828	247	1.40	0.203 75	0.41	13.23	2.6	0.471	2.5	0.987	2 487 ± 53	2 857 ± 7	13		
A0435-16.1	0.01	313	168	136	0.55	0.212 4	0.58	14.82	2.6	0.506	2.6	0.976	2 641 ± 56	2 924 ± 9	10		
A0435-17.1	0.01	742	1 066	272	1.48	0.196 16	0.40	11.53	2.6	0.426	2.5	0.988	2 288 ± 49	2 795 ± 7	18		
A0435-18.1	0.05	853	776	271	0.94	0.184 89	0.42	9.43	2.6	0.370 1	2.5	0.987	2 030 ± 44	2 697 ± 7	25		
A0435-19.1	0.02	472	424	184	0.93	0.206 81	0.46	12.90	2.6	0.452	2.6	0.984	2 406 ± 51	2 881 ± 8	16		
A0435-20.1	0.03	936	974	275	1.08	0.177 77	0.45	8.40	2.6	0.342 5	2.6	0.985	1 899 ± 42	2 632 ± 7	28		
A0436-1.1	0.12	987	208	418	0.22	0.206 71	0.30	14.04	2.6	0.492	2.5	0.993	2 581 ± 54	2 880 ± 5	10		
A0436-2.1	0.12	908	214	324	0.24	0.198 76	0.41	11.37	2.6	0.415	2.5	0.987	2 238 ± 48	2 816 ± 7	21		
A0436-3.1	0.24	909	884	248	1.00	0.171 82	0.54	7.49	2.6	0.316 2	2.5	0.978	1 771 ± 39	2 575 ± 9	31		
A0436-4.1	0.11	527	478	201	0.94	0.197 8	0.78	12.08	2.7	0.443	2.6	0.956	2 364 ± 50	2 808 ± 13	16		
A0436-5.1	0.34	1 034	1 181	299	1.18	0.179 4	0.62	8.30	2.6	0.335 4	2.6	0.972	1 865 ± 41	2 647 ± 10	30		
A0436-6.1	0.88	42	26	0.63	19.1	0.158 0	2.3	11.47	4.1	0.527	3.3	0.821	2 727 ± 74	2 434 ± 39	-12		
A0436-7.1	0.31	1 115	1 632	305	1.56	0.162 13	0.49	7.09	2.6	0.317 1	2.5	0.982	1 776 ± 40	2 478 ± 8	28		
A0436-8.1	0.52	924	1 362	249	1.52	0.161 62	0.58	6.97	2.6	0.312 7	2.6	0.975	1 754 ± 39	2 473 ± 10	29		
A0436-9.1	0.24	713	744	264	1.08	0.193 17	0.48	11.47	2.6	0.431	2.5	0.983	2 308 ± 49	2 769 ± 8	17		
A0436-10.1	0.31	345	472	169	1.42	0.215 7	0.55	16.89	2.6	0.568	2.6	0.978	2 899 ± 60	2 949 ± 9	2		
A0436-11.1	0.43	889	810	315	0.94	0.178 51	0.52	10.11	2.6	0.411	2.6	0.980	2 219 ± 48	2 639 ± 9	16		
A0436-12.1	0.07	460	668	212	1.50	0.212 1	0.49	15.66	2.6	0.536	2.6	0.982	2 765 ± 58	2 922 ± 8	5		
A0436-13.1	0.24	400	321	176	0.83	0.210 9	0.58	14.85	2.6	0.511	2.6	0.975	2 660 ± 56	2 912 ± 10	9		
A0436-14.1	0.10	716	993	302	1.43	0.205 82	0.39	13.92	2.6	0.491	2.5	0.988	2 573 ± 54	2 873 ± 6	10		
A0436-15.1	0.46	779	656	0.87	293	0.193 5	1.0	11.64	2.7	0.436	2.5	0.927	2 334 ± 50	2 772 ± 17	16		
A0436-16.1	0.12	932	1 055	273	1.17	0.179 12	0.50	8.41	2.6	0.340 7	2.5	0.981	1 890 ± 42	2 645 ± 8	29		
A0436-17.1	0.04	750	707	284	0.97	0.194 18	0.42	11.80	2.6	0.441	2.6	0.987	2 354 ± 51	2 778 ± 7	15		
A0436-18.1	0.03	903	518	283	0.59	0.187 30	0.41	9.44	2.6	0.365 4	2.5	0.987	2 008 ± 44	2 719 ± 7	26		
A0436-19.1	0.02	285	264	144	0.96	0.220 1	0.57	17.84	2.7	0.588	2.7	0.978	2 981 ± 63	2 981 ± 9	0		
A0436-20.1	0.04	760	257	285	0.35	0.212 99	0.42	12.81	2.6	0.436	2.6	0.987	2 334 ± 50	2 929 ± 7	20		
A9819-1.1	0.06	526	395	220	0.78	0.209 48	0.41	14.06	1.8	0.486 9	1.8	0.974	2 557 ± 37	2 902 ± 7	12		
A9819-2.1	0.20	624	745	266	1.23	0.209 3	0.96	14.29	2.0	0.495 2	1.8	0.879	2 593 ± 38	2 900 ± 16	11		
A9819-3.1	0.02	363	281	159	0.80	0.209 65	0.46	14.77	1.9	0.511 0	1.8	0.968	2 661 ± 39	2 903 ± 8	8		
A9819-4.1	0.16	640	449	251	0.73	0.201 86	0.41	12.67	1.8	0.455 2	1.8	0.974	2 418 ± 35	2 841 ± 7	15		
A9819-5.1	0.14	1 029	932	267	0.94	0.182 01	0.40	7.56	1.8	0.301 1	1.8	0.975	1 697 ± 26	2 671 ± 7	36		
A9819-6.1	0.18	1 344	36	230	0.03	0.121 08	0.57	3.324	1.8	0.199 1	1.7	0.950	1 171 ± 19	1 972 ± 10	41		
A9819-7.1	0.00	594	208	221	0.36	0.207 44	0.40	12.40	1.8	0.433 4	1.8	0.975	2 321 ± 34	2 886 ± 7	20		
A9819-6.2	0.42	1 982	765	277	0.40	0.147 8	1.5	3.297	2.3	0.161 9	1.8	0.754	967 ± 16	2 320 ± 26	58		
A9819-8.1	0.28	935	321	237	0.35	0.166 13	0.52	6.74	1.8	0.294 5	1.8	0.958	1 664 ± 26	2 519 ± 9	34		
A9819-9.1	0.17	848	674	245	0.82	0.185 86	0.45	8.59	1.9	0.335 2	1.8	0.969	1 863 ± 29	2 706 ± 8	31		
A9819-10.1	—	228	288	113	1.31	0.219 2	0.54	17.46	2.3	0.578	2.2	0.971	2 940 ± 52	2 975 ± 9	1		
A9819-11.1	0.58	896	864	264	1.00	0.175 2	0.76	8.24	1.9	0.341 1	1.8	0.917	1 892 ± 29	2 608 ± 13	27		
A9819-12.1	0.04	697	751	241	1.11	0.207 15	0.42	11.51	1.8	0.402 9	1.8	0.973	2 183 ± 33	2 883 ± 7	24		

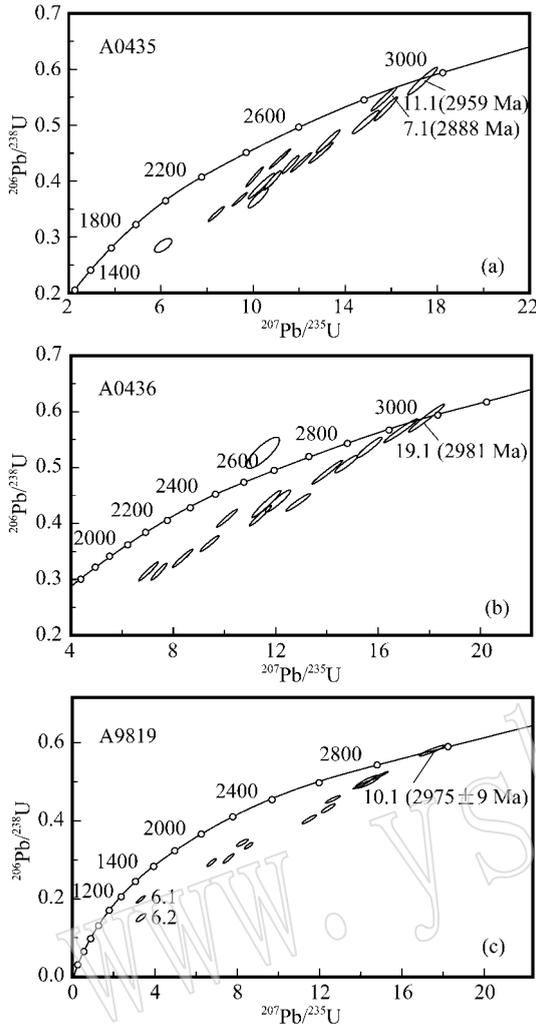


图 3 铁架山花岗岩中表壳岩碎屑锆石 U-Pb 年龄图解
Fig. 3 Concordia diagrams of SHRIMP U-Pb data for zircons from the supracrustal rocks in the Tiejiaoshan granite in the Anshan area

形式存在于铁架山花岗岩中,相互之间应为构造关系。根据变泥沙质岩石特征和鞍山地区地质演化历史,推测它们形成于新太古代,为 2.5 Ga 鞍山群的一部分。值得指出的是,虽然变泥沙质岩石地球化学组成和碎屑锆石年龄与铁架山花岗岩十分类似,但碎屑锆石形态特征与铁架山花岗岩中的锆石有所不同,表明它们来自不同的物源区。这进一步支持了中太古代为鞍山地区重要陆壳增生期的认识(万渝生等,2002)。值得注意的是,这些变质碎屑沉积岩中的碎屑锆石都无明显的磨圆,与许多太古宙后碎屑沉积岩中碎屑锆石被明显磨圆(万渝生等,2003)有很大区别。这是否表明太古宙阶段气候潮湿,化学风化强烈,还有待进一步研究。碎屑锆石普

遍存在强烈铅丢失,部分原因可能与鞍山邻区强烈的中生代岩浆作用有关(杜利林等,2005)。

另一类表壳岩为黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩,岩石也同样遭受强烈变质变形。黑云斜长片麻岩高 Na_2O 低 K_2O ,轻重稀土元素强烈分离,不存在强负铈异常(万渝生等,2002),其组成特征与上述变泥沙质岩石存在较大区别,不存在物源上的成因联系。铁架山花岗岩中可见遭受强变质变形的“斜长角闪岩+奥长花岗岩脉”地质体。所以,也不能排除铁架山花岗岩中存在早期表壳岩包体的可能。

References

- Black L P, Kamo S L, Allen C M, *et al.* 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. *Chemical Geology*, 200: 155~170.
- Cawood P A and Nemchin A A. 2000. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia [J]. *Sedimentary Geology*, 134: 209~234.
- Du Lilin, Yang Chun, Wan Yusheng, *et al.* 2005. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb chronology of Xiaolingzi granite in the Anshan area [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(4): 279~284 (in Chinese with English abstract).
- Geslin J K, Link P K and Fanning C M. 1999. High-precision provenance determination using detrital-zircon ages and petrography of Quaternary sands on the eastern Snake River Plain, Idaho [J]. *Geology*, 27: 295~298.
- Wan Yusheng, Geng Yuansheng, Shen Qihan, *et al.* 2002. Geochemical characteristics of supracrustal enclaves in Mesoproterozoic Tiejiaoshan granite of the Anshan area and its geological significance [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 37(2): 143~151 (in Chinese with English abstract).
- Wan Yusheng, Zhang Qiaoda and Song Tianrui. 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 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(22): 2500~2506.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [A]. McKibben M A, Shanks W C and Ridley W I. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes* [C]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.

附中文参考文献

- 杜利林,杨淳,万渝生等. 2005. 鞍山小岭子花岗岩地球化学及锆石 SHRIMP 年代学. *岩石矿物学杂志*, 24(4): 279~284.
- 万渝生,耿元生,沈其韩等. 2002. 鞍山中太古代铁架山花岗岩中表壳岩包体的地球化学特征及地质意义 [J]. *地质科学*. 37(2): 143~151.
- 万渝生,张巧大,宋天锐. 2003. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定 [J]. *科学通报*, 48(18): 1970~1975.