

# 鞍山地区东山杂岩 3.3 ~ 3.1Ga 岩浆作用:地球化学和锆石 SHRIMP 定年\*

董春艳 万渝生 张玉海 杨之青 刘敦一

DONG ChunYan, WAN YuSheng, ZHANG YuHai, YANG ZhiQing and LIU DunYi

中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心,北京 100037

Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2012-09-10 收稿, 2013-01-06 改回.

**Dong CY, Wan YS, Zhang YH, Yang ZQ and Liu DY. 2013. 3.3 ~ 3.1Ga magmatism recorded in an outcrop of the Dongshan Complex in the Anshan area, North China Craton: Evidence from geochemistry and SHRIMP zircon dating. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2):414-420**

**Abstract** This paper reports 3.33 ~ 3.14Ga magmatism recorded in an outcrop of the Dongshan Complex in Anshan. 3.33Ga gabbro is cut by 3.28Ga and 3.14Ga trondhjemites, with all showing metamorphism and deformation to different degrees. Meta-gabbro is high in  $\text{FeO}^T$  and low in  $\text{MgO}$ , characterized by high  $\Sigma\text{REE}$  contents and weak light/heavy REE differentiation. Trondhjemites are high in  $\text{Na}_2\text{O}$  and low in  $\text{K}_2\text{O}$ , showing strong light/heavy REE differentiation. The well-developed Paleoproterozoic to Mesoproterozoic magmatism probably suggests a long-term high-temperature process relating to mantle activity.

**Key words** Paleoproterozoic; Magmatism; Anshan; Dongshan Complex; SHRIMP

**摘要** 本文报道了鞍山地区东山杂岩一露头尺度上所记录的 3.33 ~ 3.14Ga 岩浆作用。3.33Ga 辉长岩被 3.28Ga 和 3.14Ga 奥长花岗岩切割,显示不同程度的变质变形。变质辉长岩高  $\text{FeO}^T$ 、低  $\text{MgO}$ , 稀土总量高,轻重稀土分离不强;片麻状奥长花岗岩高  $\text{Na}_2\text{O}$  低  $\text{K}_2\text{O}$ , 轻重稀土强烈分离。鞍山地区在古太古代-中太古代期间存在强烈岩浆作用,可能反映了长期的高热状态。

**关键词** 古太古代; 岩浆作用; 鞍山; 东山杂岩; SHRIMP

**中图分类号** P588.121; P588.124; P597.3

## 1 引言

华北克拉通东部的鞍山地区具有从 3.8Ga 到 2.5Ga 长期的地质演化历史,出露太古宙不同时代地质体,包括 3.3 ~ 3.8Ga 白家坟杂岩、东山杂岩和深沟寺杂岩, 3.35Ga 陈台沟表壳岩、~3.0Ga 铁架山表壳岩和 2.5Ga 鞍山群表壳岩, 3.3Ga 陈台沟花岗岩、3.14Ga 立山细粒奥长花岗岩、3.0Ga 东鞍山花岗岩、3.0Ga 铁架山花岗岩和 2.5Ga 齐大山花岗岩等(图 1)(宋彪等, 1994; Song *et al.*, 1996; 伍家善等, 1998; 万渝生等, 1997, 1998, 1999, 2001; 周红英等, 2007,

2008; Liu *et al.*, 1992, 2007, 2008; Wan *et al.*, 1997, 2005, 2012; 董春艳等, 2012)。鞍山地区的重要性不仅是 3.8Ga 岩石的发现,更在于众多时代连续、成因不同的太古宙地质体的广泛出露。本文报道了鞍山地区东山杂岩一露头尺度上所记录的 3.33 ~ 3.14Ga 岩浆作用,这可能反映了该区在那时处于长期的高热状态。

## 2 地质背景

东山杂岩呈 NW-SE 向分布,沿走向延长 1000m 以上。由于植被覆盖,可见露头宽度不大,最大宽度约 15m。它们

\* 本文受中国地质调查局重点项目(1212011120151、1212011121062)资助。

第一作者简介:董春艳,女,1976年生,副研究员,地球化学专业,主要从事变质岩和同位素年代学研究, E-mail: dongchunyan@sina.com

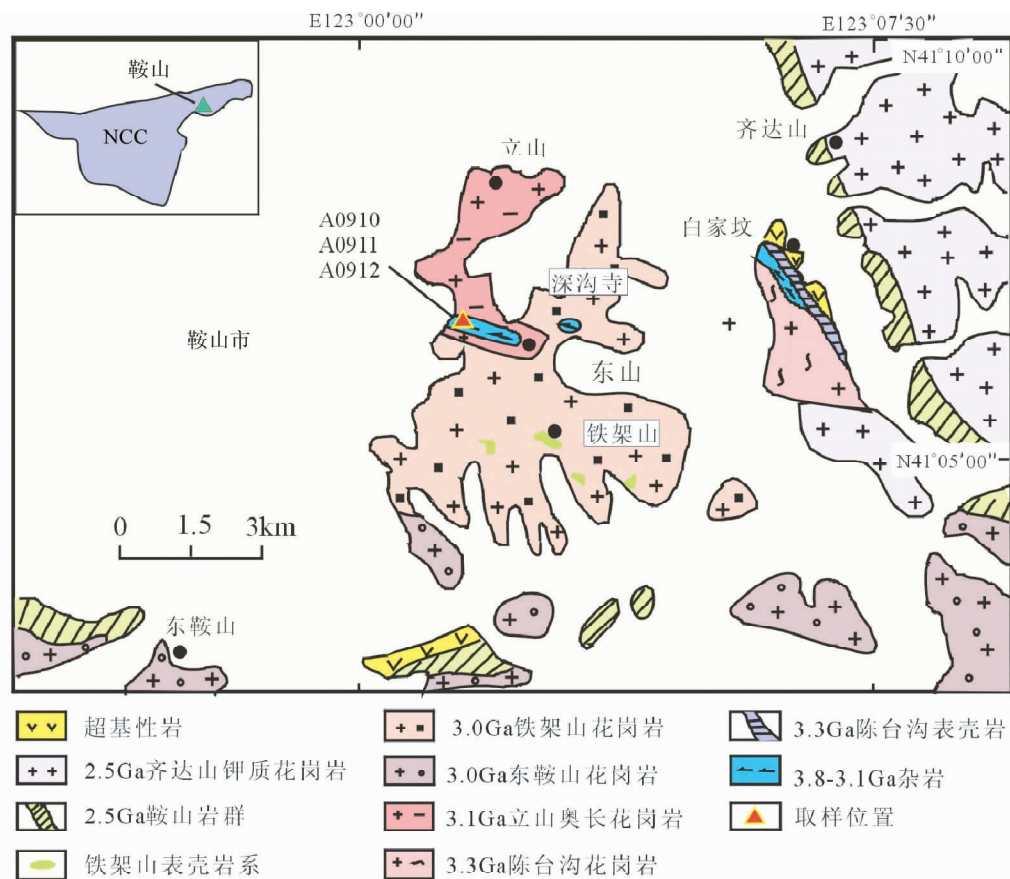


图1 鞍山地区地质图(据万渝生等, 2002)

Fig. 1 Geological map of the Anshan area (after Wan *et al.*, 2002)

呈大型包体形式存在于 3.1Ga 立山奥长花岗岩之中。在杂岩南侧多处可见立山奥长花岗岩与古老岩带直接接触。立山奥长花岗岩与铁架山花岗岩的接触关系还未观察到。根据早期的研究, 除 3.8Ga、3.7Ga 奥长花岗质岩石和 3.8Ga 变质石英闪长岩外, 东山杂岩还有 3.3Ga 斜长角闪岩、3.3Ga 闪长质片麻岩、3.3Ga 奥长花岗岩、3.1Ga 二长花岗岩以及时代不清的透闪石岩、伟晶岩脉等不同类型岩石存在。

本文涉及的三个岩石样品取自东山杂岩西段, 位于同一岩石露头(图 2a-d)。变质辉长岩(A0910)被奥长花岗岩(A0911, A0912)切割。均遭受一定程度变质变形, 具片麻理构造。它们都被伟晶岩脉切割。变质辉长岩(A0910)主要由斜长石(30%~40%)、黑云母(30%~40%)和帘石(25%~35%)组成, 含少量石英。斜长石发生帘石化, 呈细粒帘石集合体产出。黑云母呈棕色、片状, 不定向分布, 为后期蚀变产物。由于遭受后期强烈改造, 岩石的结构构造和矿物组合都发生很大变化, 原岩类型难以确定。确定其原岩为辉长岩主要是依据地球化学和锆石特征(见下)。片麻状奥长花岗岩(A0911)主要由斜长石(50%~55%)和石英(45%~50%)组成, 存在少量黑云母(<5%)。斜长石具聚片双晶, 多发生绢云母化和帘石

化。石英呈细粒集合体分布, 石英颗粒之间具三连点结构。黑云母呈片状, 分散分布。样品 A0912 与 A0911 无明显区别, 但黑云母含量更低, 变形更弱一些。一些黑云母发生蚀变, 铁质析出。

### 3 分析方法

全岩常量元素含量用 X 荧光光谱法测定, 稀土和微量元素用等离子质谱测定。测定由国家地质实验测试中心完成。SHRIMP 锆石 U-Pb 定年在北京离子探针中心完成。测年方法见 Williams (1998)。一次离子流强度为 4nA, 束斑为 25 $\mu$ m。标准锆石 SL13 ( $U = 238 \times 10^{-6}$ ) 和 TEM (年龄 = 417Ma) 分别用于未知锆石样品的 U、Th 含量和年龄修正 (Williams, 1998; Black *et al.*, 2003)。对于样品和标准锆石数据点测定均由 5 组扫描给出。TEM 与未知样品测定比例为 1:3~1:4。数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序 (Ludwig, 2001), 根据实测<sup>204</sup>Pb 进行普通铅校正。锆石年龄使用<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄。单个数据误差为 1 $\sigma$ , 加权平均年龄误差为 95% 置信度。

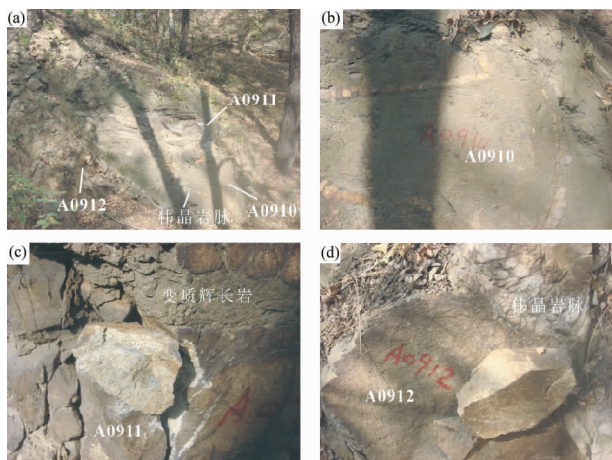


图2 鞍山地区东山杂岩古太古代岩浆岩的野外照片  
(a)-变质辉长岩(A0910)被片麻状奥长花岗岩(A0911, A0912)切割;(b)-变质辉长岩(A0910);(c)-片麻状奥长花岗岩(A0911);(d)-片麻状奥长花岗岩(A0912)

Fig.2 Field photos of Paleoproterozoic magmatic rocks in the Dongshan Complex of the Anshan area

(a)-meta-gabbro (A0910) being cut by gneissic trondhjemites (A0911, A0912); (b)-meta-gabbro (A0910); (c)-gneissic trondhjemite (A0911); (d)-gneissic trondhjemite (A0912)

## 4 地球化学

### 4.1 变质辉长岩(A0910)

岩石  $\text{SiO}_2$  含量为 50.86%, 高  $\text{FeO}^T$  (12.40%) 低  $\text{MgO}$  (4.14%), 高  $\text{K}_2\text{O}$  (3.75%) 低  $\text{Na}_2\text{O}$  (0.07%) (表1)。岩石稀土总量高( $\Sigma\text{REE} = 144 \times 10^{-6}$ ), 但轻重稀土分离不强( $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.20$ ) (图3a)。在微量元素蜘蛛网图解上, 大离子亲石元素富集, 高场强元素 Nb、P、Ti 无明显亏损(图3b)。

### 4.2 片麻状奥长花岗岩(A0911)

岩石  $\text{SiO}_2$  含量高 (71.42%),  $\text{FeO}^T$  (1.84%)、 $\text{MgO}$  (0.66%)、 $\text{CaO}$  (2.77%) 含量较低, 明显的高  $\text{Na}_2\text{O}$  (6.10%) 低  $\text{K}_2\text{O}$  (0.72%) (表1)。稀土总量高( $\Sigma\text{REE} = 354 \times 10^{-6}$ ), 轻重稀土强烈分离( $(\text{La}/\text{Yb})_N = 44.87$ ) (图3a), 高场强元素 Nb、P、Ti 相对亏损(图3b)。

### 4.3 片麻状奥长花岗岩(A0912)

与样品 A0911 元素组成特征类似, 高  $\text{Na}_2\text{O}$  (5.92%) 低  $\text{K}_2\text{O}$  (1.75%) (表1), 轻重稀土强烈分离( $(\text{La}/\text{Yb})_N = 53.64$ ) (图3a), 相对亏损 Nb、P、Ti 等高场强元素(图3b), 但稀土总量相对较低( $\Sigma\text{REE} = 118 \times 10^{-6}$ )。

表1 鞍山地区东山杂岩不同类型古太古代岩浆岩的地球化学组成(主量元素:wt%; 稀土和微量元素:  $\times 10^{-6}$ )

Table 1 Geochemical composition of different types of Paleoproterozoic magmatic rocks in the Dongshan Complex of the Anshan area (Major element: wt%; REE and trace element:  $\times 10^{-6}$ )

样品号	A0910	A0911	A0912
岩石类型	变质辉长岩	片麻状奥长花岗岩	片麻状奥长花岗岩
$\text{SiO}_2$	50.86	71.42	70.76
$\text{TiO}_2$	1.80	0.32	0.41
$\text{Al}_2\text{O}_3$	14.97	14.25	15.28
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6.29	2.04	1.63
$\text{FeO}$	6.74	0.41	0.86
$\text{MnO}$	0.26	0.07	0.07
$\text{MgO}$	4.14	0.66	0.77
$\text{CaO}$	7.31	2.77	1.89
$\text{Na}_2\text{O}$	0.07	6.10	5.92
$\text{K}_2\text{O}$	3.75	0.72	1.75
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.29	0.07	0.11
$\text{H}_2\text{O}^+$	2.64	0.56	0.90
$\text{CO}_2$	0.23	0.14	0.23
Total	99	100	101
Cr	75.50	8.23	17.30
Sc	30.50	3.10	2.88
Rb	427	39	67
Ba	509	252	1169
Sr	435	277	374
Nb	12.90	8.51	5.09
Ta	1.03	1.60	0.94
Zr	173	406	220
Hf	3.76	8.15	3.99
Y	52.70	14.50	6.06
Th	1.26	39.2	11.4
U	0.59	1.92	1.05
La	23	97	34
Ce	44	170	52
Pr	6.45	15.40	5.77
Nd	28.30	51.50	18.80
Sm	7.46	6.98	2.74
Eu	1.95	0.97	0.79
Gd	8.78	4.15	1.75
Tb	1.40	0.62	0.24
Dy	8.73	2.78	1.01
Ho	1.91	0.51	0.18
Er	5.42	1.54	0.51
Tm	0.72	0.22	0.06
Yb	4.80	1.43	0.42
Lu	0.70	0.21	0.06
$\Sigma\text{REE}$	144	354	118
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	3.20	44.87	53.64
$\text{Eu}/\text{Eu}^*$	0.74	0.51	1.04

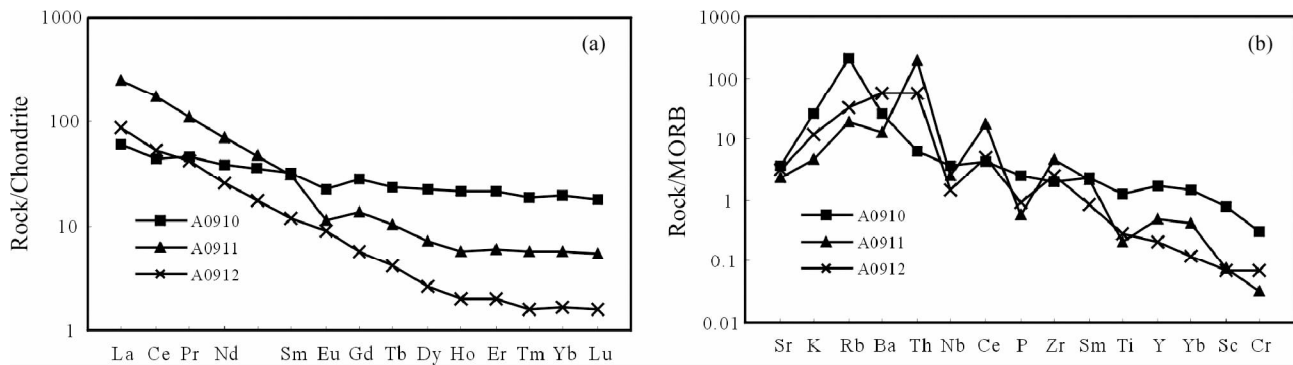


图3 鞍山地区东山杂岩古太古代岩浆岩稀土模式图(a)和微量元素图解(b)

Fig.3 REE patterns (a) and MORB-normalised trace element (b) diagrams of Paleoproterozoic magmatic rocks in the Dongshan Complex of the Anshan area

## 5 锆石特征和年龄

### 5.1 变质辉长岩(A0910)

锆石呈长柱状, 阴极发光下具板状环带(图4a, b), 与辉长岩中的岩浆锆石类似。这是确定变质原岩为辉长岩的重要依据。部分锆石遭受重结晶改造。共在11颗锆石上进行了13个数据点分析(表2)。U含量为 $67 \times 10^{-6} \sim 558 \times 10^{-6}$ , Th/U比值为0.23~0.93。较多锆石显示不同程度铅丢失, 除去2.1和其他铅丢失强烈的数据点, 5个位于和接近谐线的数据点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $3326 \pm 12\text{Ma}$  (MSWD=1.9)(图4c), 解释为辉长岩的形成时代。

### 5.2 片麻状奥长花岗岩(A0911)

锆石呈柱状, 双锥发育, 晶形良好。阴极发光下具震荡环带, 一些锆石存在组成均匀的成分域(图4d, e), 可能为重结晶所致, 但年龄与具岩浆环带的锆石无区别, 表明重结晶发生在岩浆锆石形成后不久。共在9颗锆石上进行了11个数据点分析(表2)。10个数据点(除去3.1)的U含量为 $70 \times 10^{-6} \sim 649 \times 10^{-6}$ , Th/U比值为0.22~0.81。除去强烈铅丢失的数据点(4.1)和偏离的数据点(2.1, 9.1), 其余7个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $3282 \pm 5\text{Ma}$  (MSWD=0.90)(图4f)。将该年龄解释为奥长花岗岩的形成时代。数据点3.1位于锆石端部, Th/U比值为0.01,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $3001 \pm 6\text{Ma}$ , 但存在强烈铅丢失, 难以确定是岩浆演化后期的产物或变质增生边。

### 5.3 片麻状奥长花岗岩(A0912)

锆石呈柱状或近等轴状, 晶形良好。阴极发光下锆石具震荡环带, 但内部结构均匀或环带稀疏(图4g, h)。一些锆石边部U含量高, 环带不清楚, 并呈港湾状溶蚀内部岩浆锆石(图4g中颗粒5), 它们可能是岩浆演化后期流体增加

的作用产物。共在15颗锆石上进行了23个数据点分析(表2)。核部岩浆锆石(11个数据点)的U含量为 $43 \times 10^{-6} \sim 207 \times 10^{-6}$ , Th/U比值为0.3~0.98; 与之相比, 与岩浆后期演化有关的边部锆石(7个数据点)U含量更高( $293 \times 10^{-6} \sim 914 \times 10^{-6}$ ), Th/U比值更低(0.06~0.13)。核部岩浆锆石大都位于谐和线上, 9个数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $3139 \pm 7\text{Ma}$  (MSWD=1.4)(图4i), 解释为奥长花岗岩的形成时代。边部锆石普遍存在强烈铅丢失, 上交点年龄为 $3181 + 41 / - 7\text{Ma}$ (图4i), 与核部岩浆锆石年龄基本一致。岩石中存在残余或捕获锆石, 5个数据点分析, U含量为 $62 \times 10^{-6} \sim 136 \times 10^{-6}$ , Th/U比值为0.53~0.87,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围为3253~3402Ma(图4i)。

## 6 讨论和结论

东山杂岩面积不足 $0.5\text{km}^2$ , 出露不同时代和不同成因的地质体。根据本文研究, 在同一露头, 不同类型岩石记录了3.33~3.14Ga等三期岩浆活动。3.3Ga为鞍山地区地壳形成演化的重要阶段, 3.3Ga陈台沟表壳岩和陈台沟花岗岩也形成于此时。3.33Ga变质辉长岩(A0910)由于遭受后期蚀变, 包括 $\text{K}_2\text{O}$ 在内的大离子亲石元素含量增高,  $\text{H}_2\text{O}$ 含量也明显增高。但高的稀土总量和轻重稀土分异不强可能仍反映了原辉长岩的组成特征。这与深沟寺杂岩中的变质辉长岩十分类似(Wan *et al.*, 2012)。结合东山杂岩中~3.3Ga闪长岩的发现(周红英等, 2007), 表明鞍山地区古太古代地幔岩浆作用的存在, 基性岩浆经历了高程度的结晶分异。这可能意味着鞍山地区在3.3Ga左右处于了一个伸展的构造环境。

3.28Ga片麻状奥长花岗岩(A0911)尽管明显的高 $\text{Na}_2\text{O}$ 低 $\text{K}_2\text{O}$ , 但高 $\text{SiO}_2$ , 高场强元素相对亏损, 看来其形成过程中地壳物质也起了重要的作用。在古太古代期间, 鞍山地区不但有大量地幔物质添加, 还有古老陆壳物质的再循环。此外, 岩石轻重稀土强烈分离, 与鞍山地区其它3.3Ga之后

表2 鞍山地区东山杂岩古太古代岩浆岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

Table 2 U-Pb data for the zircon from Paleoproterozoic magmatic rocks in the Dongshan Complex of the Anshan area

Spot	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\pm\%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$	$\pm\%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	$\pm\%$	err corr	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Age(Ma)	$\pm$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ Age(Ma)	$\pm$	Discordance (%)
变质辉长岩 (A0910)																
1.1	159	67	0.44	89	0.2755	0.54	24.87	2.2	0.655	2.1	0.97	3247	$\pm 55$	3337	$\pm 8$	3
2.1	146	33	0.23	80	0.2780	0.38	24.44	2.2	0.638	2.2	0.99	3179	$\pm 55$	3352	$\pm 6$	5
2.2	307	202	0.68	172	0.2720	0.31	24.49	2.1	0.653	2.1	0.99	3240	$\pm 53$	3317	$\pm 5$	2
3.1	67	28	0.44	33	0.2847	0.92	22.36	2.5	0.570	2.3	0.93	2908	$\pm 54$	3388	$\pm 14$	14
3.2	126	58	0.47	70	0.2755	0.47	24.43	2.2	0.643	2.2	0.98	3201	$\pm 55$	3338	$\pm 7$	4
4.1	363	244	0.69	169	0.2618	0.28	19.57	2.1	0.542	2.1	0.99	2793	$\pm 47$	3257	$\pm 5$	14
5.1	81	20	0.25	46	0.2735	0.54	25.03	2.3	0.664	2.3	0.97	3282	$\pm 58$	3326	$\pm 9$	1
6.1	463	374	0.83	214	0.2659	0.32	19.71	2.1	0.538	2.1	0.99	2774	$\pm 47$	3282	$\pm 5$	15
7.1	558	505	0.93	273	0.2697	0.28	21.18	2.3	0.570	2.2	0.99	2906	$\pm 52$	3304	$\pm 5$	12
8.1	206	149	0.75	108	0.2718	0.43	22.74	2.2	0.607	2.2	0.98	3058	$\pm 52$	3316	$\pm 7$	8
9.1	80	19	0.25	47	0.2734	0.64	25.82	3.3	0.685	3.2	0.98	3364	$\pm 85$	3325	$\pm 10$	-1
10.1	352	138	0.41	164	0.2602	0.42	19.36	2.3	0.540	2.2	0.98	2782	$\pm 51$	3248	$\pm 7$	14
11.1	510	438	0.89	242	0.2704	0.26	20.58	2.1	0.552	2.1	0.99	2834	$\pm 48$	3308	$\pm 4$	14
片麻状奥长花岗岩(A0911)																
1.1	70	55	0.81	41	0.2673	1.10	24.95	3.2	0.677	3.0	0.94	3333	$\pm 78$	3290	$\pm 17$	-1
2.1	289	140	0.50	155	0.2623	0.31	22.48	2.1	0.622	2.1	0.99	3116	$\pm 52$	3261	$\pm 5$	4
3.1	386	2	0.01	138	0.2228	0.36	12.72	2.1	0.414	2.1	0.99	2234	$\pm 39$	3001	$\pm 6$	26
3.2	116	49	0.44	66	0.2672	0.46	24.09	2.3	0.654	2.2	0.98	3243	$\pm 56$	3290	$\pm 7$	1
4.1	649	327	0.52	281	0.2507	0.29	17.38	2.2	0.503	2.2	0.99	2626	$\pm 47$	3189	$\pm 5$	18
5.1	176	96	0.56	103	0.2666	0.39	25.08	2.4	0.682	2.3	0.99	3353	$\pm 61$	3286	$\pm 6$	-2
6.1	397	205	0.53	221	0.2654	0.29	23.68	2.1	0.647	2.1	0.99	3216	$\pm 53$	3279	$\pm 5$	2
6.2	182	39	0.22	106	0.2644	0.37	24.70	2.2	0.678	2.2	0.99	3336	$\pm 57$	3273	$\pm 6$	-2
7.1	157	97	0.64	86	0.2658	0.49	23.09	2.2	0.630	2.2	0.98	3151	$\pm 54$	3281	$\pm 8$	4
8.1	264	81	0.32	154	0.2666	0.31	24.98	2.1	0.680	2.1	0.99	3343	$\pm 55$	3286	$\pm 5$	-2
9.1	246	76	0.32	134	0.2629	0.35	22.98	2.2	0.634	2.1	0.99	3166	$\pm 53$	3264	$\pm 6$	3
片麻状奥长花岗岩(A0912)																
1.1	107	90	0.87	60	0.2612	1.20	23.26	2.5	0.646	2.2	0.87	3213	$\pm 56$	3253	$\pm 19$	1
1.2	462	32	0.07	191	0.2319	0.37	15.28	2.1	0.478	2.1	0.98	2518	$\pm 43$	3065	$\pm 6$	18
2.1	293	27	0.10	124	0.2365	0.41	15.94	2.1	0.489	2.1	0.98	2566	$\pm 44$	3096	$\pm 6$	17
2.2	62	41	0.68	37	0.2873	1.00	26.61	2.5	0.672	2.3	0.91	3315	$\pm 60$	3402	$\pm 16$	3
3.1	101	63	0.64	55	0.2434	0.52	21.04	2.4	0.627	2.4	0.98	3138	$\pm 59$	3142	$\pm 8$	0
4.1	91	26	0.30	38	0.1664	0.81	10.97	2.4	0.478	2.2	0.94	2519	$\pm 47$	2521	$\pm 14$	0
5.1	45	31	0.71	24	0.2405	0.83	20.57	2.6	0.620	2.4	0.95	3111	$\pm 60$	3123	$\pm 13$	0
5.2	588	59	0.10	203	0.2237	0.62	12.21	2.2	0.396	2.1	0.96	2151	$\pm 38$	3007	$\pm 10$	28
6.1	104	73	0.72	57	0.2449	0.52	21.34	2.3	0.632	2.2	0.97	3158	$\pm 55$	3152	$\pm 8$	0
6.2	914	66	0.07	189	0.1735	0.69	5.70	2.2	0.238	2.1	0.95	1377	$\pm 26$	2591	$\pm 11$	47
7.1	93	62	0.69	53	0.2727	0.50	25.15	2.3	0.669	2.3	0.98	3302	$\pm 59$	3322	$\pm 8$	1
7.2	492	31	0.06	150	0.2106	0.54	10.18	2.2	0.351	2.1	0.97	1939	$\pm 35$	2909	$\pm 8$	33
8.1	502	63	0.13	194	0.2281	0.31	14.10	2.1	0.449	2.1	0.99	2389	$\pm 42$	3038	$\pm 5$	21
8.2	43	31	0.75	24	0.2418	0.85	21.27	3.3	0.638	3.2	0.97	3181	$\pm 80$	3132	$\pm 14$	-2
9.1	574	53	0.09	240	0.2417	0.27	16.21	2.1	0.487	2.1	0.99	2556	$\pm 44$	3131	$\pm 4$	18
10.1	101	54	0.55	55	0.2425	0.52	21.02	2.4	0.629	2.4	0.98	3144	$\pm 59$	3136	$\pm 8$	0
10.2	155	81	0.54	84	0.2424	0.45	21.12	2.5	0.632	2.4	0.98	3157	$\pm 61$	3136	$\pm 7$	-1
11.1	156	147	0.98	83	0.2408	0.43	20.55	2.2	0.619	2.2	0.98	3106	$\pm 53$	3125	$\pm 7$	1
12.1	589	55	0.10	190	0.2207	0.78	11.22	2.2	0.369	2.1	0.94	2023	$\pm 36$	2985	$\pm 12$	32
12.2	193	123	0.66	103	0.2436	0.40	20.73	2.2	0.617	2.1	0.98	3099	$\pm 53$	3143	$\pm 6$	1
13.1	207	134	0.67	112	0.2441	0.37	21.19	2.2	0.630	2.2	0.99	3149	$\pm 54$	3147	$\pm 6$	0
14.1	114	73	0.66	63	0.2662	0.46	23.53	2.2	0.641	2.2	0.98	3193	$\pm 55$	3284	$\pm 7$	3
15.1	136	69	0.53	80	0.2710	0.42	25.54	2.4	0.684	2.4	0.98	3358	$\pm 62$	3312	$\pm 7$	-1

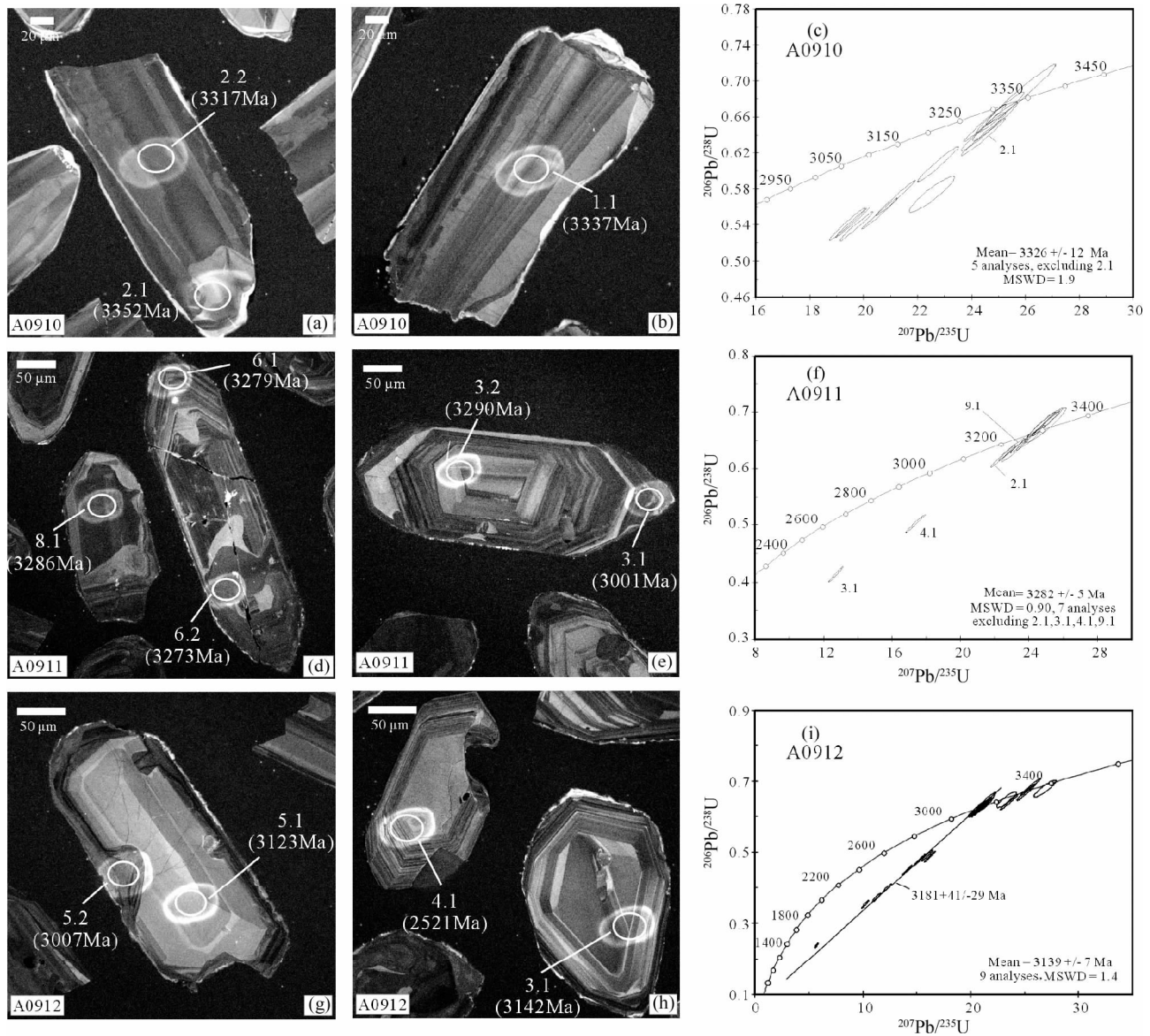


图4 鞍山地区东山杂岩古太古代岩浆岩的锆石阴极发光图像和年龄谐和图

(a-c)-变质辉长岩(A0910);(d-f)-片麻状奥长花岗岩(A0911);(g-i)-片麻状奥长花岗岩(A0912)

Fig. 4 Cathodoluminescence images and concordia diagrams of zircons from Paleoproterozoic magmatic rocks in the Dongshan Complex of the Anshan area

(a-c)-meta-gabbro (A0910);(d-f)-trondhjemite gneiss (A0911);(g-i)-trondhjemite gneiss (A0912)

的TTG花岗质岩石类似,而不同于3.45Ga之前的TTG花岗质岩石轻重稀土分异不强,支持了地热梯度在3.4Ga左右发生重大变化的认识(Wan *et al.*, 2005)。

在岩石外貌和地球化学组成特征上,3.14Ga和3.28Ga片麻状奥长花岗岩类似,但两者形成年龄不同。3.14Ga片麻状奥长花岗岩(A0912)与立山奥长花岗岩形成时代相同,东山杂岩位于立山奥长花岗岩中,推测3.14Ga片麻状奥长花岗岩为立山岩体的派生产物。样品A0912中存在3253~3402Ma残余或捕获锆石,表明岩石在形成过程中受到更古老陆壳物质的影响。

3.33Ga辉长岩被3.28Ga和3.14Ga奥长花岗岩切割,进一步支持了古太古代-中太古代期间该区存在延续和广泛岩浆作用的认识(Wan *et al.*, 2012)。鞍山地区在古太古代-中太古代期间存在强烈岩浆作用,可能反映了长期的高热状态。此外,本文还从露头尺度上进一步证明鞍山地区不同时代、不同成因地质体空间上共存是该区长期地质演化的结果,而不是后期构造作用把它们拼合到一起的。

致谢 SHRIMP 锆石定年得到张玉海高级工程师和杨之青高级工程师帮助;锆石样品靶由杨淳高级工程师制作;锆

石阴极发光图像由李宁和周丽芹工程师完成; 锆石标准由 Ian Williams 和 Lance Black 提供; 深表谢意!

## References

- Black LP, Kamob SL, Allenc CM, Aleinikoff JN, Davis DW, Korsch RJ and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1-2): 155-170
- Dong CY, Ma MZ, Liu SJ, Xie HQ, Liu DY, Li XM and Wan YS. 2012. Middle Paleoproterozoic crustal extensional regime in the North China Craton: New evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of meta-gabbro in the Anshan-Gongchangling area. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2785-2792 (in Chinese with English abstract)
- Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of  $\geq 3800$ Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339-342
- Liu DY, Wan YS, Wu JS, Wilde SA, Zhou HY, Dong CY and Yin XY. 2007. Paleoproterozoic rocks and zircons in the North China Craton. In: Van Kranendonk MJ, Smithies RH and Bennett V (eds.). *Earth's Oldest Rocks*. New York: Academic Press, 251-273
- Liu DY, Wilde SA, Wan YS, Wu JS, Zhou HY, Dong CY and Yin XY. 2008. New U-Pb and Hf isotopic data confirm Anshan as the oldest preserved segment of the North China Craton. *American Journal of Science*, 308(3): 200-231
- Ludwig KR. 2001. *Squid 1.02: A user manual*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 19
- Song B, Wu JS, Wan YS and Liu DY. 1994. The minimum age of the Chentaigou supracrustal rocks in Anshan area. *Acta Geoscientia Sinica*, 15(1-2): 14-16 (in Chinese with English abstract)
- Song B, Nutman AP, Liu DY and Wu JS. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Research*, 78(1-3): 79-94
- Wan YS, Zhang ZQ, Wu JS, Song B and Liu DY. 1997. Geochemical and Nd isotopic characteristics of some rocks from the Paleoproterozoic Chentaigou supracrustal, Anshan area, NE China. *Continental Dynamics*, 2(1): 39-46
- Wan YS, Wu JS, Liu DY, Zhang ZQ and Song B. 1997. Geochemistry and Nd, Pb isotopic characteristics of 3.3Ga Chentaigou granite in Anshan area. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(4): 382-388 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Liu DY, Wu JS, Zhang ZQ and Song B. 1998. The origin of Mesoarchaean granitic rocks from Anshan-Benxi area: Constraints of geochemistry and Nd isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 278-288 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Song B, Wu JS, Zhang ZQ and Liu DY. 1999. Geochemical and Nd and Sr isotopic compositions of 3.8Ga trondhjemitic rocks from the Anshan area and their significance. *Acta Geologica Sinica*, 73(1): 25-36 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Song B, Liu DY, Li HM, Yang C, Zhang QD, Yang CH, Geng YS and Shen QH. 2001. Geochronology and geochemistry of 3.8-2.5Ga Ancient Rock Belt in the Dongshan Scenic Park, Anshan area. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 363-370 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Song B and Liu DY. 2002. Discovery of Archaean felsic rocks with anomalous REE compositions in the Anshan area and its significance. *Geological Review*, 48(Suppl.): 45-52 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Liu DY, Song B, Wu JS, Yang CH, Zhang ZQ and Geng YS. 2005. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance. *Journal of Asian Earth Science*, 24(5): 563-575
- Wan YS, Liu DY, Nutman A, Zhou HY, Dong CY, Yin XY and Ma MZ. 2012. Multiple 3.8-3.1Ga tectono-magmatic events in a newly discovered area of ancient rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54-55: 18-30
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks WC III and Ridley WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. Reviews in Economic Geology, 7: 1-35
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. *Archaean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea Palecontinent*. Beijing: Geological Publishing House, 1-212 (in Chinese with English abstract)
- Zhou HY, Liu DY, Wan YS, Wilde SA and Wu JS. 2007. 3.3Ga magmatic events in the Anshan area: New SHRIMP age and geochemical constraints. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(2): 123-129 (in Chinese with English abstract)
- Zhou HY, Liu DY, Wan YS and Dong CY. 2008. 3.3-3.1Ga magmatism in the Dongshan complex, Anshan area, Liaoning, China: Evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2122-2126 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 董春艳, 马铭株, 刘守偈, 颜炳强, 刘敦一, 李雪梅, 万渝生. 2012. 华北克拉通古元古代中期伸展体制新证据: 鞍山-弓长岭地区变质辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和全岩地球化学. *岩石学报*, 28(9): 2785-2792
- 宋彪, 伍家善, 万渝生, 刘敦一. 1994. 鞍山地区陈台沟壳岩时代归属的初步研究. *地球学报*, 15(1-2): 14-16
- 万渝生, 伍家善, 刘敦一, 张宗清, 宋彪. 1997. 鞍山 3.3Ga 陈台沟花岗岩地球化学和 Nd, Pb 同位素特征. *地球学报*, 18(4): 382-388
- 万渝生, 刘敦一, 伍家善, 张宗清, 宋彪. 1998. 辽宁鞍山-本溪地区中太古代花岗质岩石的成因——地球化学及 Nd 同位素制约. *岩石学报*, 14(3): 278-288
- 万渝生, 宋彪, 伍家善, 张宗清, 刘敦一. 1999. 鞍山 3.8Ga 奥长花岗岩质岩石的地球化学和 Nd, Sr 同位素组成及其意义. *地质学报*, 73(1): 25-36
- 万渝生, 宋彪, 刘敦一, 李惠民, 杨淳, 张巧大, 杨崇辉, 耿元生, 沈其韩. 2001. 鞍山东山风景区 3.8-2.5Ga 古老岩带的同位素地质年代学和地球化学. *地质学报*, 75(3): 363-370
- 万渝生, 宋彪, 刘敦一. 2002. 鞍山太古宙具异常稀土组成英质岩石的发现及其意义. *地质论评*, 48(增刊): 45-52
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1-212
- 周红英, 刘敦一, 万渝生, Wilde SA, 伍家善. 2007. 鞍山地区 3.3Ga 岩浆热事件-SHRIMP 年代学和地球化学新证据. *岩石矿物学杂志*, 26(2): 123-129
- 周红英, 刘敦一, 万渝生, 董春艳. 2008. 辽宁鞍山地区东山杂岩带 3.3-3.1Ga 期间的岩浆作用——锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地质通报*, 27(12): 2122-2126