辽东半岛大金山花岗岩体 SHRIMP U-Pb 年龄、 元素地球化学和 Hf 同位素特征及地质意义

杨佳林1),顾玉超1,2),杨凤超1),李东涛1),鞠楠1),贾宏翔2)

2) 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院,北京,100083

内容提要: 辽东半岛早白垩世时期受到强烈的构造—岩浆作用使岩石圈构造环境由挤压造山向伸展减薄转变, 前人对其成因有所争议。本文通过锆石 SHRIMP U-Pb 测年、原位 Lu-Hf 同位素和主量、微量、稀土元素测试对辽东 半岛大金山花岗岩体进行了系统研究,结果显示:大金山花岗岩体结晶年龄为~124 Ma,侵位于早白垩世岩浆活动 的高峰期。岩石地球化学特征显示大金山花岗岩属弱过铝质~过铝质岩石,经历了高程度的结晶分异过程,富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素(LILE),亏损 P、Ti 等高场强元素(HFSE),中等 Eu 负异常,为 I 型花岗岩。TW003 样 品 ε_{Hf}(t)值为-25.8~-14.2,T_{DM2}为 2093~2805 Ma,岩浆物质来源于新太古代—古元古代下地壳火成岩的部分熔 融。根据年代学和岩石地球化学研究认为大金山花岗岩是古太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲所形成的活动大陆边 缘弧花岗岩,辽东半岛早白垩世的伸展环境是受板块俯冲造山后伸展作用和下地壳拆沉作用的联合制约。

关键词:伸展环境;下地壳;锆石 SHRIMP U-Pb 测年;Lu-Hf 同位素;大金山花岗岩;辽东半岛

辽东半岛位于华北地台东部,是华北克拉通东 部地块的重要组成,中生代时期受到强烈的构造— 岩浆作用使岩石圈构造环境由挤压造山向伸展减薄 转变(李三忠等,2004a,b;杨进辉等,2004,2008;林 伟等,2011),这导致了早白垩世区域大规模岩浆活 动和金成矿作用(魏俊浩等,2003a,b;Yang Jinhui et al., 2003; Wu Fuyuan et al., 2005a, b; 杨进辉等, 2008)。辽东半岛早白垩世侵入岩分布广泛、岩浆 活动强烈,其基性--中性--酸性岩体均有出露,花岗 岩类和花岗闪长岩呈大面积岩基展布,中-基性侵 入岩多呈脉岩或岩株分布。前人对辽东半岛早白垩 世岩体形成于造山后岩石圈减薄的伸展环境基本达 成一致,但对其成因有所争议(Wilde et al., 2003;李 三忠等,2004a,b;Li Sanzhong et al.,2004c;杨进辉 等,2008;徐义刚等,2009;林伟等,2011;刘俊来等, 2011);中生代成岩物质来源主要来自下地壳或壳 幔混合(魏俊浩等,2003b;郭春丽等,2004;李三忠 等, 2004b; Yang Jinhui et al., 2004a; 杨进辉等, 2007);另外,前人多对本区中生代岩基研究较多, 对岩株提及较少。本文以辽东半岛丹东地区大金山

花岗岩体为例,通过锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、原位 Lu-Hf 同位素测试和主量、微量、稀土元素特征分 析,探讨其成岩物质来源和地球动力学背景。

1 地质概况

辽东半岛位于华北板块东北部,郑庐断裂、松辽 盆地以东,北邻兴蒙造山带小兴安岭,南至渤海湾 (图1)。区域由太古代 TTG 岩系构成其基底,其上 覆盖有古元古代辽河岩群变质岩系、新元古代—震 旦纪沉积岩系。太古代 TTG 岩系主要分布于辽东 半岛南部金州、亮甲店一带,岩石类型主要为强变形 英云闪长质片麻岩和花岗质片麻岩,是辽南变质核 杂岩主要组成部分(Yang Jinhui et al.,2007c;Liu Junlai et al.,2013)。古元古代辽河岩群变质岩系广 泛分布于辽宁东部的辽阳、海城、营口、岫岩、凤城、 丹东、宽甸等地区,由中—低级变质片岩、浅粒岩、变 粒岩、大理岩和斜长角闪岩等组成。中元古代—古 生代,辽东半岛经历稳定沉积作用形成一套以砂岩、 粉砂岩和火山碎屑岩为主的巨厚沉积地层。中生代 时期辽东半岛经历了强烈的岩浆作用,三叠纪侵入

¹⁾中国地质调查局沈阳地质调查中心,沈阳,110034;

注:本文为中国地质调查项目(编号:DD20160049)和国家重点研发计划"深地资源勘查开采"重点专项(编号:2016YFC0600108)的成果。 收稿日期:2017-12-01;改回日期:2018-10-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.06.017

作者简介:杨佳林,男,1987年生,工程师,主要从事区域地质学和古生物学研究。Email:312297852@qq.com。通讯作者:顾玉超,男,1986年生,工程师,主要从事矿床学和岩石学研究。Email:guyi1224@126.com。

岩侵位年龄多集中在233~212 Ma.分布于瓦房店— 岫岩、开原--清源-带.岩性主要为碱性岩类和辉绿 岩—闪长岩—花岗岩组合:侏罗纪侵入岩侵位年龄 多集中在180~156 Ma.分布于丹东、岫岩、盖州和瓦 房店等地,多遭受早白垩时期变质变形作用而发育 碎裂岩化和糜棱岩化构造,岩性以 I 型黑云母—二 云母二长花岗岩和黑云母正长花岗岩为主:早白垩 世侵入岩在辽东地区大面积分布,基性--中性--酸 性岩体均有出露,侵位年龄多集中在 131~117 Ma, 以 I 型二长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩和 A 型 正长花岗岩、角闪石花岗岩为主(李三忠等,2004b; 吴福元等, 2005; Wu Fuyuan et al., 2005a, b; Yang Jinhui et al. 2007a. b)。大金山岩体是辽东半岛典 型早白垩世侵入岩,分布于辽宁省丹东市五龙背镇、 大金山、九连城一带,出露面积约40 km²,位于北东 向鸭绿江次级断裂内,因此岩体大体呈北东向展布, 呈不规则岩株、岩枝状侵入五龙背---大堡岩体。岩 体内面状、线状构造不发育,围岩无变形,岩性以细 粒二长花岗岩为主,常见被其他岩体切穿呈捕虏体 状。

为了对辽东半岛大金山花岗岩体进一步解体和 深入研究,本文在详细的野外地质调查基础上,选取 了2件细粒二长花岗岩样品进行分析讨论。

样品 TW002(坐标 E124°18′11″,N40°13′20″)取 自辽宁丹东五龙背镇姜家堡北约1.2 km 处。岩石 强烈风化,细粒花岗结构,块状构造。主要由钾长 石、斜长石、石英和黑云母组成(图 2a)。镜下特征 为:钾长石干涉色灰白色,半自形宽板状,负低突起, 表面可见格子双晶,为微斜长石,粒度 $\leq 0.6 \times 0.8$ mm²,含量 35%~40%;斜长石干涉色灰白色,半自 形板柱状,正低突起,表面可见细密聚片双晶和绢云 母化,NP′ \land (010) \approx 11°,为更长石,粒度 $\leq 0.4 \times 0.9$ mm²,含量 35%±;石英单偏光下无色透明洁净,干涉 色灰白色,他形粒状,正低突起,波状消光,粒度 \leq 0.5×0.6 mm²,含量 25%±;黑云母正交偏光下褐色, 半自形鳞片状,正中突起,粒度 $\leq 0.2 \times 0.4$ mm²,含 量 2%±(图 2b,c)。

样品 TW003(坐标 E124°16′51″,N40°12′32″)取 自辽宁丹东五龙背镇炮守营北东约 1.5 km 处。岩 石为细粒花岗结构,块状构造。主要由斜长石、钾长



图 1 辽东半岛构造地质图及采样位置(据 Zhang Peng et al., 2016 修改)

Fig. 1 Tectonic Geological Map and Sampling Location of Liaodong Peninsula (modified after Zhang Peng et al., 2016)



图 2 丹东大金山岩体二长花岗岩手标本特征(a、d)及显微镜下特征(b、c、e、f) Fig. 2 Photogragh (a,d) and microscope photogragh (b, c, e, f) of monzonitic granites from Dajinshan Pluton in Dandong area Bt-黑云母; Mc-微斜长石; Oli-更长石; Qtz-石英 Bt- Biotite; Mc- Microcline; Oli- Oligoclase; Otz-Ouartz

石、石英和黑云母组成(图2d)。镜下特征为:斜长 石正交偏光下灰白色,半自形长板状,正低突起,可 见聚片双晶,双晶纹细密,应为更长石,多数绢云母 化较强,粒度≤0.3×0.8 mm,约占35%±;钾长石干 涉色灰白色,半自形宽板状,负低突起,可见格子双 晶,为微斜长石,粒度≤0.7×0.8 mm,具包含结构, 微斜长石主晶包含斜长石和黑云母客晶,含量 30% ~35%;石英无色洁净,他形不规则粒状,正低突起, 波状消光,粒度≤0.5×0.6 mm,含量 30%±;黑云母 褐色鳞片状,少数为原生,多数沿长石裂隙次生,约



图 3 辽东半岛丹东大金山岩体二长花岗岩锆石阴极发光(CL)图像及测试位置 Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images and test positions of representative zircons of the monzonitic granites from Dajinshan Pluton in Dandong, Liaodong Peninsula

占 2%~3%±(图 2e、f)。

2 分析方法

实验测试前对大金山岩体二长花岗岩样品进行 人工碎样,挑选无蚀变的新鲜样品碎块进行分析测 试。锆石分选在国土资源部东北矿产资源监督检测 中心完成;制靶、阴极发光(CL)图像在中国地质科 学院北京离子探针中心完成。锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年在中国地质科学院北京离子探针中心使 用 SHRIMP II 完成。测试时一次流 O⁻²强度为 3~5 nA,束斑直径为 25 μm。标样 M257(U=840×10⁻⁶, Nasdala et al.,2008)和 TEM(年龄为 417 Ma,Black et al.,2003)分别用于锆石 U 含量和年龄校正。每 分析 3 个未知样品数据,分析 1 次标准锆石 TEM。 数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序(Ludwig, 2003)。根据实测²⁰⁴ Pb 含量校正普通铅,采用 n(²⁰⁶Pb)/n(²³⁸U)年龄为锆石年龄,同位素比值和 单点年龄误差均为 1σ。详细的测试方法、实验过 程、相关参数和误差校正同 Williams(1998)。

样品的主量元素、微量元素分析在国土资源部 东北矿产资源监督测试中心完成。主量元素分析采 用压片法 X 射线荧光光谱法(XRF),分析精度和准 确度优于 5%;微量元素分析采用电感耦合等离子 质谱法(ICP-MS),分析精度和准确度优于 10%。

样品 TW003 锆石 Lu-Hf 同位素原位分析在南 京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 带有 Merchantek/New Wave Research 213 nm 激光溶 蚀探针的 Nu Plasma MC-ICP-MS 机上进行,实验以 He 作为载气,激光束斑直径为 60 µm,溶蚀时间为 60s,溶蚀深度约为40µm,剥蚀频率为5Hz,实验



图 4 辽东半岛丹东大金山岩体二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图 Fig. 4 SHRIMP U-Pb concordia diagrams for zircons of the monzonitic granites from Dajinshan Pluton in Dandong, Liaodong Peninsula

果
は
剄
-Pb
HRIMP
So In
言結石
技
木
11
存
上
渔
Ж
东
中
⑮
壯
14
1
1
ш4

Table 1 SHRIMP U-Pb data for zircons of the monzonitic granites from Dajinshan Pluton in Dandong, Liaodong Peninsula

	1900	元素	含量	1	* ** 900			<u>≞</u>	司位素比值					」 「」	位素年龄(N	la)	
测点号	(o_c)	(×1	0_{-0})	년 =	(×10 ⁻⁶)	$n(^{207}{ m Pb}^{*})/$	'n(²⁰⁶ Pb*)	$n(^{207}{\rm Pb}^{*})$	$(/n(^{235}U))$	$n(^{206}{ m Pb}^*)$	$(/n(^{238}U))$	误差相	$n(^{206}\mathrm{Pb})$	$/n(^{238}U)$	n(²⁰⁷ Pb),	$n(^{206}{ m Pb})$	不谐和度
	(0/,)	²³² Th	²³⁸ U	>		测值	(± %)	测值	(<i>±</i> %)	测值	(∓%)	关系数	测值	$\pm 1\sigma$	测值	±1σ	(%)
				样品	¹ / ₁ TW002, ≨	田粒二大花点	讨岩, 取自近	I 宁丹东五贞	≤背镇姜家∮	程北约 1.2 kr	m 处, 坐标	E124°18'1	1″,N40°13	'20"			
1.1	0.644	837.9	591.1	0.7289	13.8	0.0480	4.3	0.1263	4.7	0.01906	1.9	0.41	121.7	±2.3	101	±100	-20
2.1	0.359	967.2	847.9	0.9059	16.1	0.0502	2.7	0.1341	3.3	0.01935	1.9	0.58	124.0	±2.3	206	± 62	39.98
3.1	0.884	359.2	205.1	0.5899	6.2	0.0492	6.8	0.1352	7.1	0.01992	2.0	0.286	127.2	±2.5	158	±160	19.75
4.1	1.058	501.1	343.2	0.7077	8.51	0.0450	8.8	0.121	0.6	0.01956	2.0	0.221	124.9	±2.5	-58	±210	315
5.1	0.574	846.7	559.8	0.6832	14.5	0.0460	4.4	0.1255	4.8	0.0198	1.9	0.396	126.4	±2.4	-4	±110	3085
6.1	0.508	1159	919.7	0.8196	18.4	0.0482	3.6	0.1220	4.1	0.01836	2.0	0.481	117.3	±2.3	109	± 84	-8.02
7.1	3.131	231.1	199.9	0.8934	4.03	0.0478	17	0.1300	17	0.01965	2.3	0.132	125.4	±2.9	90	±410	-38.9
8.1	0.366	756.8	912.9	1.2464	12.8	0.0510	4.8	0.1377	5.1	0.01957	1.9	0.377	125.0	±2.4	242	±110	48.27
9.1	1.006	825.1	485.8	0.6084	13.9	0.0469	5.8	0.1253	6.1	0.01935	2.0	0.322	123.6	±2.4	46	±140	-169
10.1	1.534	324	180.3	0.575	5.61	0.0486	9.6	0.133	6.6	0.01985	2.2	0.226	126.7	±2.8	127	±230	0.08
11.1	1.146	403.2	234.2	0.6003	7.02	0.0473	7.3	0.1305	7.6	0.02003	2.0	0.267	127.8	±2.6	62	±170	-105
12.1	1.059	438.2	219.7	0.5179	7.41	0.0511	6.7	0.1372	7.0	0.01948	2.0	0.286	124.3	±2.5	245	±160	49.31
				样品	TW003, 绯	1粒二长花岗	'岩, 取自辽	宁丹东五龙	背镇炮守营	北东约1.51	km 处,坐杨	₹ E124°16'	51",N40°1	2'32"			
1.1	0.692	629.5	581.8	0.955	11.1	0.0452	5.0	0.1273	5.3	0.02041	1.6	0.308	130.2	±2.1	-43	± 120	406.2
2.1	0.619	375	319.6	0.8808	6.18	0.044	6.7	0.1155	6.9	0.01906	1.7	0.242	121.7	±2.0	-113	± 160	207.6
3.1	1.322	153.2	249.2	1.6809	2.63	0.0454	15	0.1230	15	0.01970	2.0	0.133	125.8	±2.5	-35	± 360	458.6
4.1	1.294	381.7	279.2	0.7557	6.38	0.0438	9.8	0.1160	10	0.01919	2.4	0.236	122.6	±2.9	-122	± 240	200.4
5.1	0.83	256.4	248	0.9995	4.4	0.0474	6.4	0.1295	9.9	0.01981	1.8	0.266	126.4	±2.2	71	± 150	-78.7
6.1	2.521	213.8	159.1	0.769	3.71	0.0437	17	0.1190	17	0.01972	1.9	0.114	125.9	±2.4	-126	± 410	199.5
7.1	0.478	534.2	478.4	0.9253	9.29	0.0481	3.4	0.1337	3.7	0.02014	1.6	0.43	128.5	±2.0	106	± 79	-21.4
8.1	0.712	418.6	418	1.0318	6.81	0.0495	4.0	0.1285	4.6	0.01881	2.2	0.483	120.2	±2.6	173	± 94	30.48
9.1	0.405	311	311.5	1.0349	5.24	0.0524	4.5	0.1411	4.8	0.01953	1.7	0.36	124.7	±2.1	303	± 100	58.85
10.1	4.705	45.48	43.44	0.9868	0.759	0.0340	62	0.0860	62	0.01852	3.5	0.057	118.3	±4.1	-800	±1800	114.7
11.1	1.126	338.3	402.5	1.2294	5.83	0.0442	6.9	0.1209	7.1	0.01984	1.7	0.238	126.6	±2.1	-99	± 170	227.5
12.1	0.886	120.6	143.3	1.2276	2.25	0.0463	6.4	0.1374	6.7	0.02154	2.0	0.293	137.4	±2.7	12	± 150	-1017
13.1	1.017	233.7	148.2	0.6551	3.85	0.0446	10	0.117	10	0.01896	1.8	0.173	121.1	±2.1	-77	± 250	256.8
14.1	0.154	686	516.4	0.7779	11.4	0.0500	2.8	0.1329	3.2	0.01927	1.6	0.493	123.1	±1.9	195	± 65	36.96
15.1	1.952	163.8	225	1.4192	2.71	0.0440	16	0.1150	16	0.01889	2.0	0.123	120.6	±2.4	-109	± 390	210.5
注:误	差为 1σ,F	³ b。 和 Pb	* 分别表;	示普通铅和	1放射性铅,	普通铅使用生	²⁰⁴ Pb 校正。										

2018年

采用 MT 作为外部标样, MT 的 $n(^{176} \text{Hf})/n(^{177} \text{Hf})$ 值 为 0. 282530±30。¹⁷⁶ Lu 衰变常数为 1. 867×10⁻¹¹ a⁻¹ (Söderlund et al., 2004), 球粒陨石 $n(^{176} \text{Hf})/n(^{177} \text{Hf}) = 0. 282772, <math>n(^{176} \text{Lu})/n(^{177} \text{Hf}) = 0. 0332$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997)。亏损地幔 Hf 模 式年龄(T_{DM1})采用 $n(^{176} \text{Hf})/n(^{177} \text{Hf}) = 0. 28325,$ $n(^{176} \text{Lu})/n(^{177} \text{Hf}) = 0. 03842$ 计算, 二阶段 Hf 模式 年龄(T_{DM2})采用 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}(\text{CC})} = -0.54833, f_{\text{Lu}/\text{Hf}(\text{DM})} =$ 0. 15688 计算(Griffin et al., 2000, 2002)。

3 分析结果

3.1 锆石 CL 图像和 U-Pb 测年

大金山岩体二长花岗岩锆石 CL 图像显示(图 3),TW002 和 TW003 样品锆石形态特征较为接近, 呈半自形—自形长柱状、短柱状或等轴粒状,表面平 整干净,长轴、短轴比在4:1~1:1,粒度在 80~200 µm,震荡环带结构特征明显,为岩浆成因的原岩结 晶锆石。

为了精确测定大金山岩体二长花岗岩的成岩年 代,本次研究采用锆石 SHRIMP U-Pb 法对 TW002 和 TW003 样品分别测试了 12 个和 15 个分析点,测 试结果见表 1。TW002 样品 Th 含量为 180.3×10⁻⁶ ~919.7×10⁻⁶,U 含量为 231.7×10⁻⁶~1159×10⁻⁶, Th/U在 0.52~1.25,经过普通 Pb 校正作锆石 U-Pb 年龄谐和图(图 4a),12 个分析点落在谐和线上及 附近(图 4b),U-Pb 年龄变化于 117.3~127.8 Ma, 加权平均年龄为 124.3±1.9 Ma(n = 12, MSWD = 1.4)。TW003 样品 Th 含量为 43.4×10⁻⁶~581.8× 10⁻⁶,U 含量为 45.5×10⁻⁶~686.0×10⁻⁶,Th/U 在 0.66~1.68,经过普通 Pb 校正作锆石 U-Pb 年龄谐 和图(图 4c),15 个分析点中有 12 个分析点落在谐 和线上及附近(图 4d),U-Pb 年龄变化于 118.3~ 137.4 Ma,加权平均年龄为 124.1±1.8 Ma(*n*=12, MSWD=1.5)。结合锆石为岩浆成因锆石,因此该 年龄可以代表大金山岩体二长花岗岩年龄,侵位于 早白垩世。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石 SHRIMP U-Pb 测年后,对 TW003 样品于 锆石分析点原位进行了 Lu-Hf 同位素测试,结果见 表 2。 $n(^{176}$ Yb)/ $n(^{177}$ Hf) 值为 0.009138~0.029490, $n(^{176} \text{Lu})/n(^{177} \text{Hf}) 值为 0.000419 ~ 0.001259.$ $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})值为 0.281970 ~ 0.282287,误差$ 均为 2σ 。样品所有测试点 $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值均 小于 0.002,显示锆石形成后放射性成因176 Lu 衰变 生成的¹⁷⁶Hf极少,因此 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值可以代 表锆石形成时 Hf 同位素组成和岩石成因信息 (Patchett et al., 1981; Knudsen et al., 1981; 吴福元 等,2007b)。在进行初始 n(¹⁷⁶ Hf)/n(¹⁷⁷ Hf) 值和 $\varepsilon_{\rm H}(t)$ 计算时,样品年龄 t 值取锆石原位微区分析年 龄。15 个测点初始值 $[n(^{176} \text{ Hf})/n(^{177} \text{ Hf})]$;为 0.281968~0.282284, ε_{Hf}(0) 值为−28.4~ −17.2, ε_н(t) 值为-25.8~-14.2, 二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 为 2093 ~ 2805 Ma。 f_{Lu/Hf} 值 为 - 0.99 ~ - 0.96, 平 均值为-0.97,小于大陆地壳f_{1v/If}平均值(-0.55,



图 5 丹东大金山岩体二长花岗岩 A/CNK—A/NK 图解(a, 据 Maniar and Piccoli, 1989)、 K,O—SiO,图解(b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 5 A/CNK—A/NK diagram(a, after Maniar and Piccoli, 1989) and K₂O—SiO₂ diagram(b, after Peccerillo and Taylor, 1976) of the monzonitic granites from Dajinshan Pluton in Dandong, Liaodong Peninsula

表 2 辽东半岛丹东大金山岩体二长花岗岩(TW003)LA-MC-ICP-MS 锆石原位微区 Lu-Hf 同位素测试结果 Table 2 LA-MC-ICP-MS Lu-Hf isotopic compositions for in-situ zircons of the monzonitic granite(TW003) from Dajinshan Pluton in Dandong, Liaodong Peninsula

点 号	年龄 (Ma)	$\frac{n({}^{176}{\rm Yb})}{n({}^{177}{\rm Hf})}$		$\frac{n({}^{176}\mathrm{Lu})}{n({}^{177}\mathrm{Hf})}$		$\frac{n({}^{176}\text{Hf})}{n({}^{177}\text{Hf})}$		$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{Hf}}(t)$	$\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]$	$T_{\rm DM1}$	$T_{\rm DM2}$	$f_{\rm Lu/Hf}$
		测值	2σ	测值	2σ	测值	2σ				((
1.1	130.2	0.029490	0.000635	0.001259	0.000027	0.282064	0.000038	-25.0	-22.3	0.282061	1683	2593	-0.96
2.1	121.7	0.015051	0.000080	0.000654	0.000004	0.282165	0.000021	-21.5	-18.9	0.282163	1517	2372	-0.98
3.1	125.8	0.022417	0.000336	0.000977	0.000014	0.282190	0.000032	-20.6	-17.9	0.282188	1495	2315	-0.97
4.1	122.6	0.027845	0.000452	0.001205	0.000019	0.281970	0.000034	-28.4	-25.8	0.281968	1811	2805	-0.96
5.1	126.4	0.029017	0.000579	0.001237	0.000023	0.282069	0.000044	-24.9	-22.2	0.282066	1675	2585	-0.96
6.1	125.9	0.014205	0.000697	0.000624	0.000031	0.282097	0.000031	-23.9	-21.2	0.282096	1609	2520	-0.98
7.1	128.5	0.023403	0.000516	0.001021	0.000019	0.282046	0.000045	-25.7	-22.9	0.282044	1697	2632	-0.97
8.1	120.2	0.025884	0.000498	0.001099	0.000020	0.282192	0.000050	-20.5	-18.0	0.282189	1498	2315	-0.97
9.1	124.7	0.022050	0.000142	0.000959	0.000007	0.282145	0.000027	-22.2	-19.5	0.282143	1557	2416	-0.97
10.1	118.3	0.009138	0.000064	0.000419	0.000003	0.282214	0.000023	-19.7	-17.2	0.282213	1440	2263	-0.99
11.1	126.6	0.023973	0.000678	0.001023	0.000028	0.282037	0.000049	-26.0	-23.3	0.282034	1710	2655	-0.97
12.1	137.4	0.023797	0.000356	0.001039	0.000013	0.282287	0.000044	-17.2	-14.2	0.282284	1362	2093	-0.97
13.1	121.1	0.028178	0.000677	0.001218	0.000028	0.282161	0.000047	-21.6	-19.0	0.282158	1545	2383	-0.96
14.1	123.1	0.026250	0.000527	0.001117	0.000022	0.282021	0.000033	-26.5	-23.9	0.282019	1736	2692	-0.97
15.1	120.6	0.014328	0.000102	0.000620	0.000005	0.282204	0.000023	-20.1	-17.5	0.282203	1462	2285	-0.98

注,计算公式如下,

$$\begin{split} \varepsilon_{\rm Hf}(t) &= 10000 \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{n(^{176}{\rm Hf})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm s} - \left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm s} \cdot (e^{\Lambda t} - 1)}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR,0} - \left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR} \cdot (e^{\Lambda t} - 1)} - 1 \right\}; \quad T_{\rm DM1} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{\left[\frac{n(^{176}{\rm Hf})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm s} - \left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm DM}}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR,0} - \left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR} \cdot (e^{\Lambda t} - 1)} - 1 \right\}; \quad T_{\rm DM1} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{\left[\frac{n(^{176}{\rm Hf})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm s} - \left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm DM}} \right\} \\ T_{\rm DM \ 2CC} &= T_{\rm DM1} - (T_{\rm DM1} - t) \cdot \frac{f_{\rm CC} - f_{\rm S}}{f_{\rm CC} - f_{\rm DM}}; \\ f_{\rm Lu'Hf} &= \frac{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR}}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} - 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} - 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} \left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} + 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} - \left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR}} - 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} - \left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR}} + \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} - 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} + 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} + 0 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR}} - 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR}} + 0 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm H}} + 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} + 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} + 0 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR}} + 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm CHUR}} + 1 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S} + 0 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm Lu})}{n(^{177}{\rm Hf})} \right]_{\rm S}} + 0 \\ \frac{1}{\left[\frac{n(^{176}{\rm$$

Griffin et al.,2002),因此二阶段模式年龄(*T*_{DM2})可 以更真实反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间 或其源区物质的平均地壳存留年龄(黄道袤等, 2016)。

3.3 主量、微量、稀土元素

大金山岩体二长花岗岩主量、微量、稀土元素测 试结果见表 3。TW002 样品 SiO₂含量为 69.6% ~ 71.4%、平均 70.7%; Al₂O₃为 14.7% ~ 15.8%; CaO 为 0. 50% ~ 0. 73%; MgO 为 0. 49% ~ 0. 67%; 富碱 (Na₂O+K₂O 为 7. 45% ~ 8. 09%) 且较为富钾(K₂O/ Na₂O 为 1. 46~1. 62); Fe₂O₃含量 1. 78% ~ 2. 37%, FeO 含量 0. 22% ~ 0. 58%, 具高 Fe³⁺/Fe²⁺特征。结 晶分异指数 *DI* 为 87. 2~89. 8; A/CNK 值在 1. 28~ 1. 35, 属于弱过铝质—过铝质岩石(图 5a); 在 K₂ O—SiO₂图解上位于高钾钙碱性系列—钾玄岩系列 区(图5b, 邓晋福等, 2015b)。TW003样品SiO,

表3辽东半岛丹东大金山岩体二长花岗岩主量元素含量(%)和微量元素(×10⁻⁶)含量

Table 3 Major elements (%) and trace elements ($\times 10^{-6})$ compositions of the monzonitic granite

from Dajinshan Pluton in Dandong, Liaodong Peninsula

样号	TW002-1	TW002-2	TW002-3	TW002-4	TW002-5	TW003-1	TW003-2	TW003-3	TW003-4	TW003-5
SiO ₂	69.61	70.42	71.44	71.02	70.90	73.38	74.66	73.21	75.03	75.73
TiO ₂	0.30	0.27	0.24	0.28	0.23	0.11	0.08	0.10	0.09	0.08
Al_2O_3	15.77	15.12	14.65	14.90	15.06	13.93	13.61	14.05	13.05	13.19
Fe_2O_3	2.37	2.23	1.90	2.20	1.78	1.43	1.08	1.36	0.99	1.05
FeO	0.27	0.36	0.45	0.22	0.58	0.31	0.49	0.67	0.72	0.36
MnO	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
MgO	0.67	0.57	0.49	0.55	0.51	0.21	0.19	0.21	0.27	0.21
CaO	0.66	0.65	0.50	0.73	0.60	0.82	0.72	0.77	0.65	0.71
Na ₂ O	3.25	3.18	3.24	2.85	3.05	3.54	3.26	3.38	3.10	2.93
K ₂ O	4.74	4.86	4.84	4.60	4.93	5.21	4.96	5.06	4.96	4.88
P_2O_5	0.09	0.07	0.08	0.09	0.08	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05
烧失	2.22	2.05	1.71	2.26	2.07	0.90	1.02	1.04	0.87	0.85
总量	99.96	99.81	99.58	99.74	99.84	99.91	100.13	99.91	99.79	100.06
Na ₂ O+K ₂ O	7.98	8.04	8.09	7.45	7.99	8.75	8.22	8.44	8.06	7.81
K ₂ O/Na ₂ O	1.46	1.53	1.49	1.62	1.62	1.47	1.52	1.49	1.60	1.67
A/CNK	1.35	1.30	1.28	1.35	1.31	1.07	1.13	1.13	1.12	1.16
DI	87.24	88.27	89.84	87.61	88.76	92.21	92.29	91.37	92.42	92.29
Cr	25.5	18.1	30.5	22.7	18.0	30.1	22.1	18.1	21.7	14.7
Rb	115	112	117	110	116	102	103	102	104	102
Sr	325	315	318	303	322	108	114	113	105	113
Ba	854	886	997	820	965	371	426	391	409	458
Zr	138	126	104	120	113	96.9	102	121	103	86.2
Nb	12.0	11.1	9.41	11.8	10.3	7.88	5.57	7.98	6.88	5.98
Hf	5.17	3.85	3.07	3.83	4.29	3.64	4.08	4.23	3.73	3.21
Та	0.78	0.77	0.71	0.82	0.93	0.74	0.27	0.29	0.46	0.41
Th	5.39	6.12	4.36	5.40	7.39	5.15	5.35	5.09	5.04	4.22
U	1.64	1.81	1.08	2.80	1.94	1.33	1.29	1.29	1.12	1.34
Ga	19.6	19.9	18.4	18.8	18.6	17.7	17.4	19.2	16.7	17.0
Y	8.93	9.85	7.20	11.02	9.44	5.25	6.52	5.20	4.63	6.89
Nb/Ta	15.5	14.4	13.2	14.3	11.1	10.6	20.6	27.1	15.1	14.7
Zr/Hf	26.7	32.6	33.9	31.4	26.4	26.6	25.0	28.7	27.7	26.9
La	117.27	151.80	102.37	165.17	131.52	78.42	117.73	81.72	75.13	100.26
Се	87.40	101.80	69.80	107.32	98.17	55.20	79.90	52.04	49.38	75.16
Pr	59.04	72.53	49.86	77.63	67.91	42.79	57.59	44.03	41.42	60.31
Nd	41.13	49.14	34.33	53.64	46.26	29.90	38.46	30.62	28.59	40.26
Sm	18.69	22.10	15.23	24.72	20.89	13.68	17.48	14.32	13.01	18.49
Eu	10.72	12.07	9.21	13.61	12.11	6.85	8.27	6.07	5.58	8.66
Gd	12.17	14.56	9.47	15.74	14.02	7.60	10.46	7.65	6.75	6.97
Tb	9.84	11.47	7.86	12.57	10.86	6.47	8.18	6.60	6.04	7.31
Dy	6.63	7.27	5.14	8.19	7.10	4.01	5.07	4.24	3.63	4.46
Ho	5.65	5.94	4.22	6.73	5.76	3.29	3.94	3.48	2.92	3.53
Er	5.61	6.10	4.25	6.80	5.58	3.35	4.19	3.36	3.10	3.67
Tm	8.43	6.71	7.57	8.86	6.88	6.78	5.25	5.73	5.88	5.61
Yb	3.68	3.97	4.08	3.45	3.70	3.14	4.10	3.24	2.70	3.49
Lu	5.08	5.24	3.58	5.87	5.04	2.95	3.58	2.91	2.44	3.17
Σ REE	116.69	140.13	96.08	150.59	130.82	77.23	108.97	76.66	71.51	102.09
LREE/HREE	15.41	16.67	16.58	16.18	16.19	16.78	18.52	16.35	17.41	21.87
Eu/Eu *	0.71	0.67	0.77	0.69	0.71	0.67	0.61	0.58	0.60	0.76
<u></u>		$n(Al_2O)$	3)		1290	0		n(Na) + n(K) +	-2n(Ca)
往: A/CN	$\mathbf{K} = \frac{1}{n (Ca)}$	$(0) + n(Na_2)$	$0) + n(K_2 0)$	$\frac{1}{2}; t/t = -1$	$n \frac{496000}{100} + 0.9$		213.15,具	M = -	$n(Al) \cdot n($	(Si),

$$\ln \frac{1}{w(\mathrm{Zr})} + 0.$$

且令 n(Si)+n(Al)+n(Fe)+n(Mg)+n(Ca)+n(Na)+n(K)+n(P) = 100%,据 Watson and Harrison(1983)。DI 为标准矿物组分:石英+正长石+钠长石+霞石+白榴石+六方钾霞石,据 Thornton and Tuttle(1960)。

含量为 73.2% ~ 75.7%、平均 74.4%,略高于 TW002; Al₂O₃为 13.1% ~ 14.1%; CaO 为 0.65% ~ 0.82%; MgO 为 0.19% ~ 0.27%; 富碱(Na₂O+K₂O 为 7.8% ~ 8.8%) 且较为富钾(K₂O/Na₂O 为 1.47 ~ 1.67),与TW002 接近; Fe₂O₃含量 0.99% ~ 1.43%, FeO 含量 0.31% ~ 0.72%, 具高 Fe³⁺/Fe²⁺特征。结 晶分异指数 *DI* 为 91.4 ~ 92.4, 分异程度略高于 TW002; A/CNK 值在 1.07 ~ 1.16, 铝饱和程度略低 于TW002,属于弱过铝质岩石(图 5a); 在K₂O—SiO₂ 图解上位于高钾钙碱性系列—钾玄岩系列区(图 5b,邓晋福等, 2015b)。

TW002 和 TW003 样品在微量元素原始地幔标 准化配分图解上具高度相似特征(图 6a),呈典型花 岗岩类微量元素标准化分布趋势,富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素(LILE),亏损 P、Ti 等高场强元 素(HFSE),高 Rb 低 Sr 的元素特征反映了钾长石和 斜长石结晶在花岗岩中占据主导地位,这与其矿物 组成特征相吻合。

TW002 和 TW003 样品 ΣREE 较低,分别为 96.1×10⁻⁶~150.6×10⁻⁶、71.5×10⁻⁶~109.0×10⁻⁶,在 球粒陨石标准化图解上呈显著右倾趋势(图 6b),轻 稀土较重稀土更为富集,LREE/HREE 分别为 15.4 ~16.7、16.4~21.9。δEu 分别为 0.67~0.77、0.58 ~0.76,中等 Eu 负异常,结合低 Ca、Al、Sr 及 Sr/Y 值特征,指示岩浆残留相中可能富集斜长石、角闪石 而亏损石榴子石。

4.1 成岩时代及意义

根据锆石 SHRIMP U-Pb 年代学测试结果, TW002 和 TW003 样品加权平均年龄分别为 124.3± 1.9 Ma(n=12, MSWD=1.4) 和 124.1±1.8 Ma(n= 12, MSWD=1.5),结合锆石为岩浆成因锆石,因此 该年龄可以代表大金山岩体二长花岗岩年龄,侵位 于早白垩世。

1549

吴福元等(2005)建立了辽东半岛中生代花岗 质岩浆作用的年代学格架,所获得的68个早白垩世 年龄数据范围为118~131 Ma.认为辽东半岛是以早 白垩世侵入岩为主的地区,其岩石类型繁多,中酸性 侵入岩多呈大规模岩体出现,如饮马湾山岩体二长 花岗岩和花岗闪长岩 120~125 Ma、古道岭岩体似斑 状花岗岩和二长花岗岩 118~121 Ma、德兴街岩体似 斑状花岗岩 127~128 Ma 和五龙背岩体似斑状花岗 岩 125~126 Ma 等(吴福元等,2005);中-基性辉长 岩、辉绿岩、闪长岩等多呈岩脉或岩株出现;如海城 炒铁河辉长岩(126 Ma, 苗来成等, 2010)、灌水辉绿 岩(128 Ma)、甜水辉绿岩(126 Ma)和石庙山闪长岩 (120 Ma)等(吴福元等, 2005)。值得一提的是, 岫 岩地区帽盔山二长花岗岩年龄为137 Ma、荒地花岗 闪长岩年龄为139 Ma、朝阳苏长辉长岩年龄为139 Ma(刘杰勋等,2016),是辽东地区新近发现的最早 的白垩世侵入岩,经研究认为同样形成于非造山的 伸展环境,也就是说,辽东半岛早白垩世伸展构造背 景和岩浆活动的起始时间不晚于~139 Ma。

本文获得的大金山二长花岗岩体 124 Ma 左右 的侵位年龄,略晚于大面积五龙背—大堡岩基



Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace elements patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the monzonitic granites from Dajinshan Pluton in Dandong Liaodong Peninsula (chondrite normalization data from Sun and McDonough, 1989)

4 讨论

(~125 Ma,未刊数据),与其呈岩株、岩枝状侵入五 龙背—大堡岩体的野外地质现象相符;同时也印证 了~125 Ma 是辽东半岛白垩世岩浆活动的高峰期。 而从金成矿作用角度看,辽东半岛金矿床的多形成 于120~125 Ma(魏俊浩等,2003a;Yang Jinhui et al., 2003),与早白垩世大规模岩浆活动时代吻合,暗示 了岩浆作用导致的大规模流体循环和热异常(吴福 元等,2008)。

4.2 岩石类型和成因

吴福元等(2007a)研究认为东北地区中生代花 岗岩主要以高度分异的 I 型为主,少数为 A 型,基本 不存在 S 型花岗岩。从大金山二长花岗岩样品显微 镜下特征和全岩地球化学分析可以看出,其矿物组 成不含角闪石,具高 SiO₂、富碱和高 FeO^T/MgO 值特 征,DI 指数在 87.2~92.4;富集 Rb、Th、U、K 等大离 子亲石元素(LILE),亏损 P、Ti 等高场强元素 (HFSE),可能与磷灰石、钛铁氧化物的结晶分异有 关;中等 Eu 负异常、Sr 亏损指示岩浆源区残留相有 富钙的斜长石残留;主量、微量、稀土元素特征表明 大金山岩体经历了高程度的结晶分异过程。然而, 当花岗岩经历高程度结晶分异的作用后,矿物组成 和化学成分均趋近于低共结的花岗岩,使用含铝指 数(A/CNK 值)划分花岗岩的成因类型会出现偏差 (吴福元等,2007a),而 Al、P、Zr、Nb、Ce、Y、Ga 等元 素是判断花岗岩成因类型的可靠标志(Whalen et al.,1987;Eby,1990;Chappell and White,1992)。在





FG- Crystallization differentiation I-type and S-type granite area; OGT- I-type, S-type and M-type granite area

花岗岩成因类型 $FeO^T/MgO-(Zr + Nb + Ce + Y)$ 、 (K₂O+Na₂O)/CaO-(Zr+Nb+Ce+Y)和 10000×Ga/ Al-(Zr+Nb+Ce+Y)判别图上均投点于 FG(分异的 I型、S型花岗岩)区(图7a、b,Whalen et al.,1987;c, Eby,1990);在 P_2O_5 -SiO₂散点图上追加趋势线, P_2O_5 随 SiO₂含量升高而降低呈负相关趋势(图7d), 结合岩石属弱过铝质岩石,以及岩石中不含白云母、 董青石等过铝质矿物特征,认为大金山二长花岗岩 为 I 型花岗岩。

前人对辽东半岛中生代侵入岩体做了相关同位 素示踪原岩岩浆源区研究,结果显示:早一中侏罗世 小黑山杂岩体主要来源于古老镁铁质下地壳物质的 部分熔融,幔源岩浆直接参与了花岗岩的成岩作用 (杨进辉等,2007);晚侏罗世丹东花岗岩体原岩以 古元古代中酸性壳源岩石为主(李三忠等,2004b); 早白垩世古道岭岩体来源于新生下地壳、古老下地 壳和岩石圈地幔三个端元岩浆的分离结晶和混合 (Yang Jinhui et al.,2004a);早白垩世饮马湾山岩体 来自岩石圈地幔、下地壳的岩浆混合,并受地壳混染 作用形成(郭春丽等,2004);早白垩世三股流岩体 成岩物质来源于下地壳,在侵位过程中未受到上地 壳源物质的混染(魏俊浩等,2003b)。综上可见,辽 东半岛中生代侵入岩成岩物质来源主要来自下地壳 或壳幔混合。

根据上文主量、微量和稀土元素结果,岩浆源区 残留相有富钙的斜长石残留,暗示大金山花岗岩不

可能是由幔源岩浆分异而来(吴福元等,2007a);相 对富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素,亏损 高场强元素(HFSE),Sr、Nb、Ta、Ti元素负异常,同 样指示其不可能由软流圈物质部分熔融直接形成 (Foley et al., 1992);样品 SiO,含量几乎均在 70%以 上,且具有高 Al(14.7%~15.8%)、低 Mg(0.49%~ 0.67%)特征,证明原岩幔源岩浆物质贡献很少:8 个 Nb/Ta 值数据在 10.6~ 15.5 范围内(2 个数据 Ta 值异常低),略低于幔源岩石(~17.5, Hofmann, 1988) 而略高于陆壳岩石 (~ 11, Taylor and Mclennan,1985),可能是因为黑云母的分离结晶作 用使 Nb/Ta 值偏高(Stepanov and Hermann, 2013); Zr/Hf 值分别为 26.4~ 33.9、25.0~ 28.7,均远低于 幔源岩石(~ 36.3, Hofmann, 1988), 接近或略低于 壳源岩石(~33, Taylor and Mclennan, 1985), 上述都 反映了岩石具初始壳源岩浆特征。在 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 一年龄 图解和[n(¹⁷⁶Hf)/n(¹⁷⁷Hf)];一年龄图解上投点于 下地壳与上地壳演化线的中间区域(图 8a,b):锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄 T_{DM2}为 2805~2093 Ma. 较低的[n(¹⁷⁶Hf)/n(¹⁷⁷Hf)]:组成特征(0.281968~ 0.282284) 和负 ε_н(t) 值特征(-25.8~-14.2) 表明 岩浆源区主要来自新太古代—古元古代地壳物质的 再循环。

4.3 构造背景及意义

通过区域构造地质学研究发现,辽东半岛地区 广泛发育以伸展断陷盆地、低角度拆离断层、变质核



图 8 TW003 样品锆石微区 ε_{Hf}(t)—年龄相关图解和[n(¹⁷⁶Hf)/n(¹⁷⁷Hf)]_i—年龄相关图解 (底图 a,b 据吴福元等,2007b)

Fig.8 Related illustrations of $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ —Age and $[n(^{176}{\rm Hf})/n(^{177}{\rm Hf})]_i$ —Age for the different domains in zircons of the sample TW003 (a, b after Wu Fuyuan et al., 2007b)



图 9 丹东大金山花岗岩 Rb—Y+Nb 图解(a 据 Pearce et al., 1984)、Rb/30—Hf—3×Ta 三元图解(b 据 Harris et al., 1986)和 R₁—R₂图解(c 据 Batchelor et al., 1985)

Fig. 9 Rb—(Y+Nb) diagram(a, after Pearce et al., 1984), Rb/30—Hf—3×Ta diagram (b, after Pearce and Harris, 1984) and R₁—R₂ diagram(c, after Batchelor et al., 1985) of Dajinshan granite in Dandong

 $R_1 = 4n(Si) - 11[n(Na) + n(K)] - 2[n(Fe) + n(Ti)]; R_2 = n(Al) + 2n(Mg) + 6n(Ca)$

杂岩和同构造花岗岩为主的伸展构造,形成年龄总体介于 135~106 Ma(林伟等,2011;刘俊来等,2011);而杨进辉等(2004)通过对万福糜棱岩和古道岭花岗岩矿物单颗粒激光⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 测年得到了 121~113 Ma 变形年龄,认为是岩石圈减薄、地幔性质转变的结果。大金山岩体二长花岗岩属弱过铝质~过铝质、高钾钙碱性系列岩石,其主量元素特征指示原岩具有弧岩浆作用特征(Martin,1993)。在Rb-(Y+Nb)图解和 Rb/30—Hf—3×Ta 三元图解上投点在火山弧花岗岩区域(图 9a,b),印证了上述观点,可能为大洋板块向大陆板块俯冲所形成的活动大陆边缘弧花岗岩(邓晋福等,2015a);在 R₁—R₂图解上,投点在造山后花岗岩区域(图 9c),指示造山后伸展环境。

目前学者们对辽东半岛白垩世伸展构造环境已 经达成共识,虽然对岩石圈伸展减薄的开始和结束 时间并未统一,但对其峰期高度一致,为120~130 Ma(姜耀辉等,2005;吴福元等,2008;徐义刚等, 2009);对其成因机制的认识也可以归结为以下四 种:古太平洋板块向东亚俯冲挤压后伸展(Li Sanzhong et al.,2004c;徐义刚等,2009);华北克拉通 破坏及拆沉机制(林伟等,2011;Yang Wei and Li Shuguang,2008);冈瓦那超大陆裂解作用的结果 (Wilde et al.,2003);Izanagi 板块与欧亚板块之间的 交互作用以及岩石圈结构调整、深部流体活动和壳 幔拆离作用(刘俊来等,2011)。笔者认为其受前两 种观点的联合制约。

古地磁资料显示:古太平洋板块于 145~ 135

Ma 以约 NW50°向欧亚大陆俯冲(Engebretson et al., 1985);Izanagi 板块于中侏罗世向欧亚大陆正向俯 冲,早白垩世初期改变方向而向正北运动并斜向俯 冲于东亚大陆之下(Maruyama et al.,1997;朱光等, 2004;徐义刚等,2009);辽东半岛西部的郯庐断裂作 为二者运动的响应,记录了二者的应力变化,其北东 向的产状可能是受南东向欧亚板块伸展回弹应力和 正北向俯冲应力联合控制(朱光等,2004)。大金山 花岗岩体形成于~124 Ma,岩体于地表呈近北东向 展布,晚于古太平洋板块俯冲,与其俯冲后伸展回弹 的时代和方向均耦合,也印证了岩石圈减薄作用的 峰期;而与 Izanagi 板块正北向俯冲方向和应力性质 不符。冈瓦那超大陆裂解作用虽然伸展环境与辽东 半岛早白垩世一致,但应力方向目前尚未有准确定 义和证据。

吴福元等(2008)通过对比资料,认为华北克拉 通东部自早古生代以来发生了百余千米的岩石圈减 薄,目前仍然有拆沉作用和热侵蚀作用两种主流成 因机制。本文支持拆沉作用机制:辽东半岛受到古 太平洋俯冲导致岩石圈增厚,于早白垩世下地壳产 生减压和部分熔融,当重力失稳发生拆沉作用;其浅 部形成的伸展拆离构造和广泛分布的变质核杂岩可 作为拆沉作用的证据(林伟等,2011;刘俊来等, 2011);早白垩世高峰的岩浆活动对应了其减薄作 用的快速短暂特征,可能是拆沉作用的重要时期。

因此,本文认为辽东半岛早白垩世的伸展环境 是受古太平洋板块向欧亚大陆俯冲造山后伸展作用 和拆沉作用的联合制约。

5 结论

(1)本文获得辽东半岛大金山花岗岩体两组年 龄分别为 124.3±1.9 Ma 和 124.1±1.8 Ma,侵位于 早白垩世,印证了~125 Ma 是辽东半岛白垩纪岩浆 活动的高峰期。

(2)结合大金山花岗岩体主量、微量、稀土元素 特征和锆石 Lu-Hf 同位素特征,认为大金山花岗岩 为活动大陆边缘 I 型花岗岩,岩浆物质来源于新太 古代一古元古代下地壳火成岩的部分熔融。

(3)辽东半岛早白垩世的伸展环境是受古太平 洋板块向欧亚大陆俯冲造山后伸展作用和拆沉作用 的联合制约。

致谢:感谢中国地质科学院矿产资源研究所陈 仁义研究员和中国地质大学(北京)肖荣阁教授对 本文的指导和宝贵意见。感谢审稿专家和章雨旭研 究员对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 赵国春, 孟斐, 马帅, 姚图. 2015a. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换.地质论 评, 61(3): 473~484.
- 邓晋福,刘翠,冯艳芳,肖庆辉,狄永军,苏尚国,赵国春,段培新, 戴蒙. 2015b.关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议.地 质论评,61(4):717~734.
- 顾玉超,陈仁义,贾斌,宋万兵,余昌涛,鞠楠.2017.内蒙古边家大 院铅锌银矿床深部正长花岗岩年代学与形成环境研究.中国地 质,44(1):101~117.
- 郭春丽,吴福元,杨进辉,林景仟,孙德有.2004.中国东部早白垩 世岩浆作用的伸展构造性质——以辽东半岛南部饮马湾山岩体 为例.岩石学报,20(5):1193~1204.
- 黄道袤, 万渝生, 张德会, 董春艳, 赵元艺. 2016. 华北克拉通南缘 下汤地区古元古代构造热事件——地球化学特征、锆石 SHRIMP U-Pb 定年和 Hf 同位素研究. 地质论评, 62(6): 1439 ~1461.
- 姜耀辉, 蒋少涌, 赵葵东, 倪培, 凌洪飞, 刘敦一. 2005. 辽东半岛煌 斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对中国东部岩石圈减薄开始 时间的制约. 科学通报, 50(19): 2161~2168.
- 李三忠,刘建忠,赵国春,吴福元,韩宗珠,杨中柱.2004a.华北克 拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约——以 胶辽地区为例,岩石学报,20(3):633~646.
- 李三忠,郝德峰,赵国春,孙敏,韩宗珠,郭晓玉.2004b.丹东花岗 岩的地球化学特征及其成因.岩石学报,20(6):1417~1423.
- 林伟,王清晨,王军,王非,褚杨,陈科.2011. 辽东半岛晚中生代伸 展构造——华北克拉通破坏的地壳响应.中国科学:地球科学, 41(5):638~653.
- 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):573~591.
- 刘俊来,纪沫,申亮,关会梅, Gregory A D. 2011. 辽东半岛早白垩

世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵.中国科学:地球科学,41(5):618~637.

1553

- 刘杰勋, 郭巍, 朱凯. 2016. 辽东岫岩地区早白垩世侵入岩的年代 学、地球化学及地质意义.岩石学报, 32(9): 2889~2900.
- 苗来成,张福勤,刘敦一,石玉若,颉颃强.2010.辽宁海城炒铁河 辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义.科学通报,55(4~ 5):342~349.
- 魏俊浩,刘丛强,李志德,赵永鑫. 2003a. 论金矿床成矿年代的确 定——以丹东地区成岩成矿 Rb-Sr、U-Pb 同位素年代为例.地质 学报,77(1):113~119.
- 魏俊浩,刘丛强,唐红峰.2003b.辽东五龙地区燕山期侵入岩类同 源岩浆演化微量元素、同位素证据与金矿成矿.地质论评,49 (3):265~271.
- 吴福元,杨进辉,柳小明.2005.辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的 年代学格架.高校地质学报,11(3);305~317.
- 吴福元,李献华,杨进辉,郑永飞.2007a.花岗岩成因研究的若干问题.岩石学报,23(6):1217~1238.
- 吴福元,李献华,郑永飞,高山. 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石 学应用.岩石学报,23(2):185~220.
- 吴福元,徐义刚,高山,郑建平.2008.华北岩石圈减薄与克拉通破 坏研究的主要学术争论.岩石学报,24(6):1145~1174.
- 徐义刚,李洪颜,庞崇进,何斌. 2009. 论华北克拉通破坏的时限. 科 学通报,54(14):1974~1989.
- 杨进辉,吴福元,罗清华,钟孙霖,张艳斌,Simon A Wilde. 2004. 辽 宁丹东地区侏罗纪花岗岩的变形时代:⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年代学制约. 岩石学报,20(5):1205~1214.
- 杨进辉,吴福元,柳小明,谢烈文,杨岳衡.2007. 辽东半岛小黑山 岩体成因及其地质意义:锆石 U-Pb 年龄和铪同位素证据.矿物 岩石地球化学通报,26(1):29~43.
- 杨进辉,吴福元,钟孙霖,罗清华.2008. 华北东部早白垩世花岗岩 侵位的伸展地球动力学背景:激光⁴⁰ Ar/³⁹ Ar 年代学证据.岩石 学报,24(6):1175~1184.
- 杨进辉,吴福元.2009. 华北东部三叠纪岩浆作用与克拉通破坏.中 国科学 D 辑:地球科学, 39(7):910~921.
- 朱光,王道轩,刘国生,牛漫兰,宋传中.2004. 郯庐断裂带的演化 及其对西太平洋板块运动的响应. 地质科学, 39(1): 36~49.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogeneticinterprelation of granitoid rock series using muhication. Chemical Geology, 48(1): 43~55.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J, Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chemical Geology, 200(1~2): 155~170.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle—crust system. Earth and Planetary Science Letters, 148(1~2): 243~258.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 83(1~2): 1~26.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015a&. Magmatic arc and ocean— continent transition: discussion. Geological Review, 61 (3): 473~484.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015b&. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: discussion and suggestion. Geological Review. 61(4): 717~734.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence

and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. Lithos, $26(1 \sim 2)$; $115 \sim 134$.

- Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. Special Paper of the Geological Society of America. 206(9), 1~60.
- Foley S, Amand N. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their orogin. Lithos, 28:182~185.
- Gu Yuchao, Chen Renyi, Jia Bin, Song Wanbing, Yu Changtao, Ju Nan. 2017 &. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the syenogranite from the Bianjiadayuan Pb—Zn—Ag deposit of Inner Mongolia and its tectonic implications. Geology in China, 44(1): 101~117.
- Guo Chunli, Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Lin Jingqian, Sun Deyou. 2004&. The extensional setting of the Early Cretaceous magmatism in eastern China: example from the Yinmawanshan pluton in southern Liaodong Peninsula. Acta Petrologica Sinica, 20(5): 1193 ~1204.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Van Achterbergh E, O'Reilly S Y, 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(1): 133~147.
- Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu Xisheng, Zhou Xinmin. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithosphere, 61(3): 237~269.
- Harris N B, Pearce J A, Yindle A G. 1986.Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. Geological Society of London Special Publication, 19(5): 67~81.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the earth: therelationship between mantle continental crust, and oceanic crust. Earth and Planetary Science Letters, 90: 297~314.
- Huang Daomao, Wan Yusheng, Zhang Dehui, Dong Chunyan, Zhao Yuanyi. 2016&. Paleoproterozoic tectono— thermal events in the Xiatang area, Lushan county, Southern margin of the North China Craton. Geological Review, 62(6): 1439~1461.
- Jiang Yaohui, Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Ni Pei, Ling Hongfei, Liu Dunyi. 2005&. SHRIMP U-Pb zircon dating for lamprophyre from Liaodong Peninsula: Constraints on the initial time of Mesozoic lithosphere thinning beneath eastern China. Chinese Science Bulletin, 50(19): 2612~2620.
- Knudsen T L, Griffin W L, Hartz E H, Andresen A, Jackson S E. 2001. In-situ hafnium and lead isotope analyses of detrital zircons from the Devonian sedimentary basin of NE Greenland: A record of repeated crustal reworking. Contributions to Mineralogy and Petrology, 141 (1): 83~94.
- Li Sanzhong, Liu Jianzhong, Zhao Guochun, Wu Fuyuan, Han Zongzhu, Yang Zhongzhu.2004a&. Key geochronology of Mesozoic deformation in the eastern block of the North China Craton and its constraints on regional tectonics: a case of Jiaodong and Liaodong Peninsula. ActaPetrologicaSinica. 20(3): 633~646.
- Li Sanzhong, Hao Defeng, Zhao Guochun, Sun Min, Han Zongzhu, Guo Xiaoyu. 2004b&. Geochemical features and orgin of Dandong granite. Acta Petrologica Sinica. 20(6): 1417~1423.
- Li Sanzhong, Zhao Guochun, Sun Min, Wu Fuyuan, Hao Defeng, Han Zongzhu, Luo Yan. 2004c. Mesozoic, not Palaeoproterozoic SHRIMP U-Pb zircon ages of two Liaoji granites, eastern block, North China Craton.International Geology Review, 46: 162~176.
- Lin Wei, Wang Qingchen, Wang Jun, Wang Fei, Chu Yang, Chen Ke.

2011 #. Late Mesozoic extensional tectonics of the Liaodong Peninsula massif: Response of crust to continental lithosphere destruction of the North China Craton. Science China—Earth Sciences, 54: 843~857.

- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, Wang Rucheng, Hu Huan. 2003&. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A -type rock suites. Geological Journal of China Universites, 9(4): 573~591.
- Liu Junlai, Ji Mo, Shen Liang, Guan Huimei, Gregory A D. 2011#. Early Cretaceous extensional structures in the Liaodong Peninsula: Structural associations, geochronological constraints and regional tectonic implications. Science China——Earth Sciences, 41 (5): 618~637.
- Liu Junlai, Shen Liang, Ji Mo, Guan Huimei, Zhang Zhaochong, Zhao Zhidan. 2013. The Liaonan/Wanfu metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Two stages of exhumation and constraints on the destruction of the North China Craton. Tectonics, 32(5): 1121~1141.
- Liu Jiexun, Guo Wei, Zhu Kai. 2016&. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Early Cretaceous intrusive rocks from Xiuyan area, eastern Liaoning Province. Acta Petrologica Sinica, 32(9); 2889~2900.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0——A geochronological toolkit for Microsoft Excel.Bekeley Geochronology Center, Special Publication, 4: 1 ~70.
- Maniar P and Piccoli P. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101: 635~643.
- Martin H. 1993. The mechanism of petrogenesis of the Archean continental crust——comparison with modern processes.Lithos, 30: 373~388.
- Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, Terabayashi M. 1997. Paleogeographic maps of the Japanese islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present.Island Arc, 6: 121~142.
- Miao Laicheng, Zhang Fuqin, Liu Dunyi, Shi Yuruo, Xie Hangqiang. 2010&. Zircon SHRIMP U-Pb dating for gabbro at Chaotiehe in the Haicheng area, eastern Liaoning. Chinese Science Bulletin, 55(4~ 5): 342~349.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Martinson J M, Corfu F, Dörr W, Kamo S L, Kennedy A K, Kronz A, Reiners P W, Frei D, Kosler J, Wan Yusheng, Götze J, Häger T, Kröner A, Valley J W. 2008. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. Geostandards and Geoanalytical Research, 32(3): 247~265.
- Patchett P J, Kouvo O, Hedge C E and Tatsumoto M. 1981. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hfisotopes.Contributions to Mineralogy and Petrology, 78(3): 279 ~297.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks.Journal of Petrology, 25: 956~983.
- Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 50:63~81.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D and Isachsen C E. 2004. The ¹⁷⁶ Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. Earth and Planetary Science Letters, 219(3~4): 311~324.
- Stepanov A S and Hermann J. 2013. Fractionation of Nb and Ta by

biotiteand phengite: Implications for the "missing Nb paradox". Geology, 41(3): 303~306.

- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J. eds. Magmatism in Oceanic Basins. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Taylor S R and Mclennan S M. 1985. The Continental Crust: ItsComposition and Evolution.Oxford: Blackwell, 91~92.
- Thornton C and Tuttle O. 1960. Chemistry of igneous rocks, part1: Differentiation index.America Journal of Science, 280: 664~684.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effect in avariety of crustal magmas types. Earth and Planetary Science Letters, 64(2): 295~304.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407~419.
- Wei Junhao, Liu Congqiang, Li Zhide, Zhao Yongxin. 2003a&. U-Pb, Rb-Sr isotopic dating of the diagenesis and mineralization of gold deposits in the Dandong area. Acta Geologica Sinica, 77(1): 113~ 119.
- Wei Junhao, Liu Congqiang, Tang Hongfeng. 2003b&. Metallogeny of gold deposits and evidence of isotopes and trace elements for the comagmatic evolution of the Yanshanian intrusive rocks in the Wulong area, Eastern Liaoning. Geological Review, 49(3): 265 ~ 271.
- Wilde S A, Zhou X H, Nemchin A A, Sun M. 2003. Mesozoic crust mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. Geology, 31: 817~820.
- Williams I S. 1998. U—Th—Pb Geochronology by Ion Microprobe. In: McKibben M A, Shanks W C and Ridley W I. eds. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology, 7: 1~35.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Liu Xiaoming. 2005&. Geochronologica framework of the Mesozoic granitic magmatism in the Liaodong Peninsula Northeast China. Geological Journal of China Universities, 11(3):305~317.
- Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, Zhang Xiao'ou, Yang Jinhui. 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. Earth and Planetary Science Letters, 233: 103~119.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Wilde S A, Zhang Xiao' ou. 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of the Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. Chemical Geology, 221:127~156.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007a&. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217~1238.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007b&. Lu-Hf isotopic systematicsand their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2):185~220.
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Gao Shan, Zheng Jianping. 2008&.

Lithospheric thinning and destruction of North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 24(6) :1145~1174.

- Xu Yigang, Li Hongyan, Pang Chongjin, He Bin. 2009#. On the timing and duration of the destruction of the North China Craton. Chinese Science Bulletin, 54(14): 1974~1989.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning.Ore Geology Reviews, 23:125~152.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, Wilde S A, Chu Meifei. 2004. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, northeast China.Geochimica et Cosmochimica Acta, 68(21): 4469 ~4483.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Luo Qinghua, Zhong Sunlin, Zhang Yanbin, Simon A Wilde. 2004&. Deformation age of Jurassic granites in the Dandong area, eastern China: ⁴⁰ Ar/³⁹ Ar geochronological constraints. Acta Petrologica Sinica, 20(5): 1205~1214.
- Yang Jinhui, Sun Jinfeng, Chen Fukun, Wilde S A, Wu Fuyuan. 2007a. Sources and petrogenesis of late Triassic dolerite dikes in the Liaodong Peninsula: Implications for post-collisional lithosphere thinning of eastern North China Craton. Journal of Petrology, 48: 1973~1977.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Wilde S A, Liu Xiaoming. 2007b. Sources and petrogenesis of late Triassic granitoids in the Liaodong Peninsula and their relationship to lithospheric thinning of North China Craton. Chemical Geology, 242: 155~175.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Liu Xiaoming, Xie Liewen, Yang Yueheng. 2007& Petrogenesis and Geological Significance of the Jurassic Xiaoheishan Pluton in the Liaodong Peninsula, East China: In-situ Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Analysis. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 26(1): 29~43.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Zhong Sunlin, Luo Qinghua. 2008&. The extensional geodynamic setting of Early Cretaceous granitic intrusions in the North China Craton: Evidence from laser ablation ⁴⁰ Ar/³⁹ Ar dating of K-bearing minerals. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1175 ~1184.
- Yang Jinhui and Wu Fuyuan. 2009#. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the eastern North China Craton. Science China Earth Sciences, 39(7):910~921.
- Yang Wei and Li Shuguang. 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning: implications for lithospheric thinning of the North China Craton. Lithos, 102(1): 88 ~117.
- Zhang Peng, Zhao Yan, Kou Linlin, Yang Hongzhi, Yang Fengchao. 2016. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology of copper—molybdenum deposits in southeast Liaoning Province, China. International Geology Review, 58(12): 1~11.
- Zhu Guang, Wang Daoxuan, Liu Guosheng, Niu Manlan, Song Chuanzhong. 2004&. Evolution of the Tan-lu fault zone and its responses to plate movements in west Pacific Basin. Chinese Journal of Geology, 39(7): 910~921.

SHRIMP U-Pb Ages, Elements Geochemistry and Hf Isotopic Characteristics of the Dajinshan Granite in Liaodong Peninsula and Geological Significance

YANG Jialin¹¹, GU Yuchao^{1,21}, YANG Fengchao¹¹, LI Dongtao¹¹, JU Nan¹¹, JIA Hongxiang²¹

1) Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Shenyang, 110034;

2) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083

Objectives: Liaodong Peninsula is known to have been subjected to strong tectonism and magmatism which transitions from a compressional orogeny to extension and lithosphere thinning in the early Cretaceous. Previous researchers still have a disagreement on such a formation process.

Methods: We performed the zircon SHRIMP U-Pb isotopic dating, in situ micro-area Lu-Hf isotope test, major elements and trace elements compositions of the monzonitic granite from Dajinshan Pluton of Liaodong Peninsula.

Results: The crystallization age of the Dajinshan granite is 124 Ma, which belongs to peak period of the Early Cretaceous magmatic activity. The geochemical characteristics of the rocks show that Dajinshan granite is a kind of rock which experienced a high degree of crystallization process, belongs to weak peraluminous ~ peraluminous rock series. The Dajinshan granite is I-type granite which enriched with LILE such as Rb, Th, U and K; yet deficient on HFSE like P, Ti, etc, and Eu is medium negative anomalous. The zircon $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ values of TW003 are between $-25.8 \sim -14.2$, $T_{\rm DM2}$ are between 2093 Ma and 2805 Ma.

Conclusions: Dajinshan granite is the active continental margin arc granite formed by the Paleo- Pacific plate subduction to the Eurasia plate. The lithogenous materials are the product of partial melting of mafic—ultramafic source rock in late Archean—Palaeoproterozoic lower crust, and mixed with felsic materials from upper crust during magma invasion. The Cretaceous extensional environment is influenced by the effect of the postorogenic extension and delamination of lower crust in the Liaodong Peninsula.

Keywords: Extensionalenvironment; Lower crust; Zircon SHRIMP U-Pb dating; Lu-Hf isotope; Dajinshan granite; Liaodong Peninsula, Eastern China.

Acknowledgements: This study is supported by Geological Survey Project of China (No.: DD20160049) and National Key Research and Development Program of China (No.: 2016YFC0600108). Thanks to Prof. CHEN Renyi of Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences and Prof. XIAO Rongge of China University of Geosciences (Beijing) for their valuable suggestions for revision on this article. Thanks to review experts and Prof. ZHANG Yuxu for their valuable amendments and suggestions

First author: YANG Jialin, male, born in 1987, engineer, mainly engaged in Regional Geology and Paleontology. Email: 312297852@qq.com

Corresponding author: GU Yuchao, born in 1986, engineer, PHD candidate, mainly engaged in deposit geology and petrology. Email: guyi1224@126.com

Manuscript received on: 2017-12-01; Accepted on: 2018-10-20; Edited by: ZHANG Yuxu **Doi**: 10.16509/j.georeview.2018.06.017