

# 医巫闾山地区早白垩世同伸展花岗岩就位机制\*

李刚<sup>1</sup> 刘正宏<sup>1</sup> 崔维龙<sup>1</sup> 白相东<sup>2</sup>

LI Gang<sup>1</sup>, LIU ZhengHong<sup>1</sup>, CUI WeiLong<sup>1</sup> and BAI XiangDong<sup>2</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

2. 防灾科技学院, 三河 065201

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China

2016-03-21 收稿, 2016-06-30 改回.

Li G, Liu ZH, Cui WL and Bai XD. 2016. Emplacement of Early Cretaceous syn-extension granitic in Yiwulüshan area, North China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9):2677–2689

**Abstract** The Shishan pluton formed at about 124Ma is the syn-tectonic granite of Early Cretaceous extension with NWW shear sense in Yiwulüshan area. The major and trace element of the granite shows the characteristics of adakites. The high concentration of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and alkaline content, and low  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  and MgO concentration, indicate the magma may be come from the partial melting of crustal rocks. In addition, the magmatic zircons have  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values from  $-26.7$  to  $-20.3$  and  $t_{\text{DM2}}$  are between 2.0Ga and 2.3Ga indicate the adakitic magma was derived by partial melting of the lower part of the thickened crust of North China block. The magma emplacement of Shishan pluton has three stages could be identified by the analyses of the deformed fabrics from wall rocks and magmatic fabrics from the granites. The Shishan pluton shows a horizontal shape with the subrotund outcrop at major part and two banded granitic dikes at western part, which is the result of diapirism and ballooning of magma and the stretched shear of wall rock. We suggest that the extension at shallow crust could control the emplacement and shape of the pluton. But the partial melting of lower crust has no direct relationship with the shallow extension, instead, the lithospheric thinning and the field of regionally extensional stress may be the cause of partial melting.

**Key words** Emplacement; Extension; Petrogenesis; Metamorphic core complex; Yiwulüshan area; North China block

**摘要** 石山岩体形成的时间约为 124Ma, 是医巫闾山地区早白垩世 NWW 向伸展变形的同构造花岗岩体。花岗岩的主量、微量元素含量表现出埃达克质岩浆的特点,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及碱性组分含量较高, 而  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  和 MgO 含量较低, 岩浆锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值 =  $-26.7 \sim -20.3$ 、 $t_{\text{DM2}} = 2.0 \sim 2.3\text{Ga}$ , 表明岩浆来源于华北陆块加厚下地壳的部分熔融。通过对围岩变形组构与岩体中岩浆组构的分析, 可将石山岩体的就位过程划分为三个阶段。在岩浆底劈、膨胀作用和围岩伸展滑移的共同影响下, 石山岩体最终形成了主体呈近圆形、西部发育两个岩墙的形态。岩浆就位过程与围岩变形组构的相互关系, 表明中、浅部地壳的伸展变形可以控制岩浆的就位过程和最终形态, 但与下地壳部分熔融的关系不大, 岩石圈减薄及区域伸展应力场是下地壳发生部分熔融的诱因。

**关键词** 岩浆就位; 伸展变形; 岩石成因; 变质核杂岩; 医巫闾山地区; 华北陆块

**中图法分类号** P542; P588.121; P597.3

2003; Vernon *et al.*, 2004; Weinberg *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2011), 越来越多的研究成果表明在这个复杂的过程中, 构造变形及断层活动起到重要的控制作用 (Castro, 1987; Hutton *et al.*, 1990; Johnson *et al.*, 2003; Weinberg *et al.*, 2009)。在岩体就位的过程中, 不同的岩浆运移方式、岩浆就

## 1 引言

岩体就位的过程是一个包括了岩浆形成、演化、运移、就位等多个阶段的复杂过程 (Ramsay, 1989; Johnson *et al.*,

\* 本文受国家自然科学基金项目(41272223, 41402169, 41340024)资助。

第一作者简介: 李刚, 男, 1986年, 讲师, 构造地质学专业, 主要从事造山带与盆地构造和显微构造研究, E-mail: ganglijlu@alixun.com

位形态以及不同的构造变形性质或断层性质,都会导致岩体具有不同的就位过程 (Johnson *et al.*, 2003; Vernon *et al.*, 2004; Weinberg *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2011; Turrillot *et al.*, 2011)。通过对围岩及岩体中的变形和岩浆组构或者地磁组构进行统计分析来研究岩浆运移、就位的过程是研究岩体就位机制的常用方法。

医巫闾山地区经历了中-晚侏罗世和早白垩世两期构造变形并最终形成了变质核杂岩 (张必龙等, 2011; 李刚等, 2010, 2012, 2013; Li *et al.*, 2013)。虽然对于早期构造变形是挤压还是伸展的争议较大,但是普遍认同研究区在早白垩世发生了伸展变形 (马寅生等, 1999; Darby *et al.*, 2004; 张必龙等, 2011; 李刚等, 2012, 2013; Li *et al.*, 2013; Lin *et al.*, 2013a, b)。研究区中-晚侏罗世和早白垩世的两期构造变形均伴随着同构造花岗岩体就位,同构造岩体与围岩中均发育有岩浆或变形组构,可以对岩体就位机制进行详细研究。

本文尝试通过结合构造解析、同位素分析及岩石地球化学分析等多种方法,研究医巫闾山地区早白垩世同构造花岗岩体的岩浆来源和就位机制,分析伸展变形在岩浆就位过程中起到的作用。

## 2 区域地质背景

医巫闾山变质核杂岩位于华北陆块北缘、燕山山脉东段,整体的构造格局呈北东向延伸 (图 1)。医巫闾山变质核杂岩可划分为三个主要结构层:核部、中间层、同伸展断陷盆地 (马寅生等, 1999; 李刚等, 2012)。核部由新太古代至古元古代的变质基底和中生代的同构造花岗岩组成,中间层为中元古代的变质沉积岩,中间层与核部之间发育一条韧性拆离带 (图 2)。瓦子峪拆离断层为变质核杂岩的主拆离断层,控制着上盘的同伸展断陷盆地 (即阜新-义县盆地) (图 2)。医巫闾山变质核杂岩的形成过程可以归纳为中-晚侏罗世和

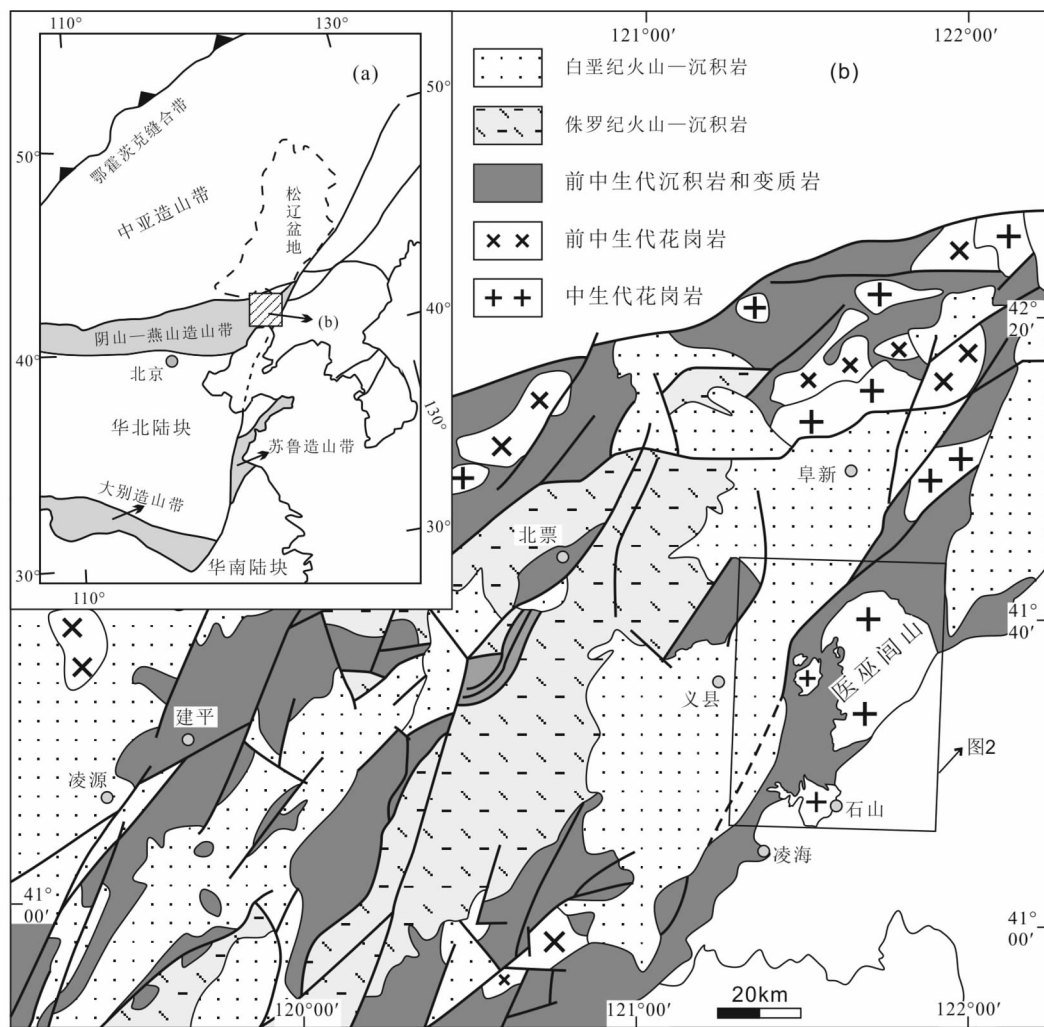


图 1 辽西地区地质简图 (据 Lin *et al.*, 2013b)

Fig. 1 Simplified geological map of western Liaoning Province area (modified after Lin *et al.*, 2013b)

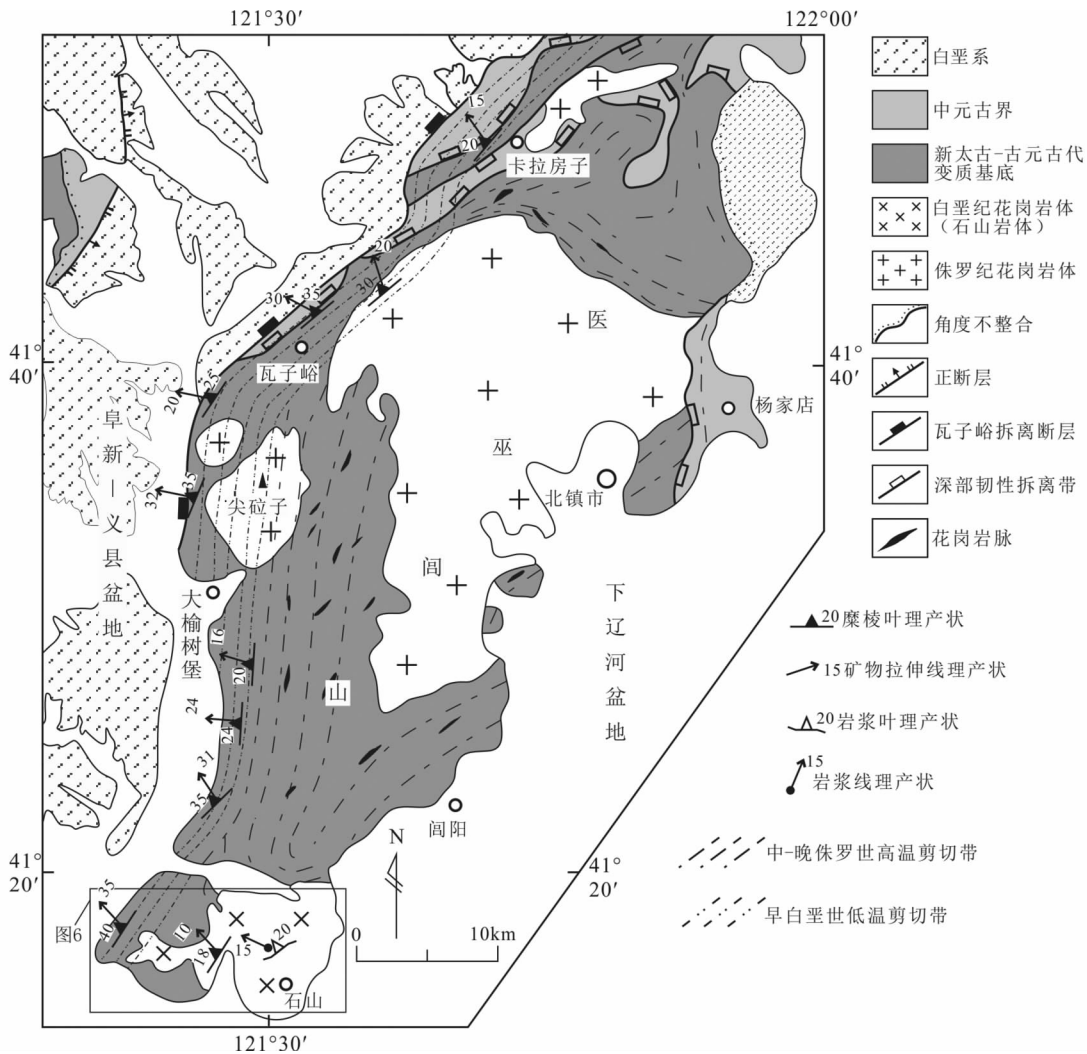


图2 医巫闾山地区构造纲要图(据李刚等, 2012; Lin *et al.*, 2013b)

Fig. 2 Simplified structural map of the Yiwulushan area (modified after Li *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2013b)

早白垩世两个主要活动阶段(Darby *et al.*, 2004; 张必龙等, 2011; 李刚等, 2012; Lin *et al.*, 2013b)。早期构造变形发生在中部地壳层次,使整个医巫闾山地区发生了以角闪岩相为主的高温韧性变形(李刚等, 2012)。晚期构造作用发生在地壳浅部层次,主要影响了医巫闾山地区的西部,形成了瓦子峪拆离断层及上盘同伸展断陷盆地,拆离断层下盘形成了低温韧性剪切带(Darby *et al.*, 2004; 李刚等, 2012, 2013; Lin *et al.*, 2013a, b)。

医巫闾山地区晚中生代的两期构造变形过程中均伴随着强烈的岩浆活动,早期同构造岩浆活动时间为  $153 \pm 2\text{Ma}$  ~  $169 \pm 10\text{Ma}$ (杜建军等, 2007; 李刚等, 2012; 吴福元等, 2006; Zhang *et al.*, 2008, 2010, 2014a)。晚期伸展变形过程中伴随着石山花岗岩体和一些铁镁质岩脉的就位,这些岩体和岩脉就位的时间大致为  $123 \sim 125\text{Ma}$ (Darby *et al.*, 2004; 吴福元等, 2006; Zhang *et al.*, 2010),本文以石山岩

体作为主要研究对象,分析医巫闾山地区早白垩世伸展背景下岩浆就位机制。

### 3 样品岩石学特征

石山岩体是研究区内唯一的早白垩世花岗岩体,该岩体位于医巫闾山变质核杂岩的南部,距凌海市约 13km,石山镇位于岩体的东南部(图 1、图 2),地表出露面积约为  $141.4\text{km}^2$ ,东部宽西部狭窄。主要岩性为黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩,主要矿物为石英(20% ~ 35%)、斜长石(20% ~ 35%)、钾长石(25% ~ 50%)、云母(5% ~ 15%)(图 3),局部褐铁矿含量较多。岩体西侧见有糜棱岩化现象,中部和东部基本未变形。选取未变形岩石样品进行锆石同位素及全岩主量、微量元素分析。

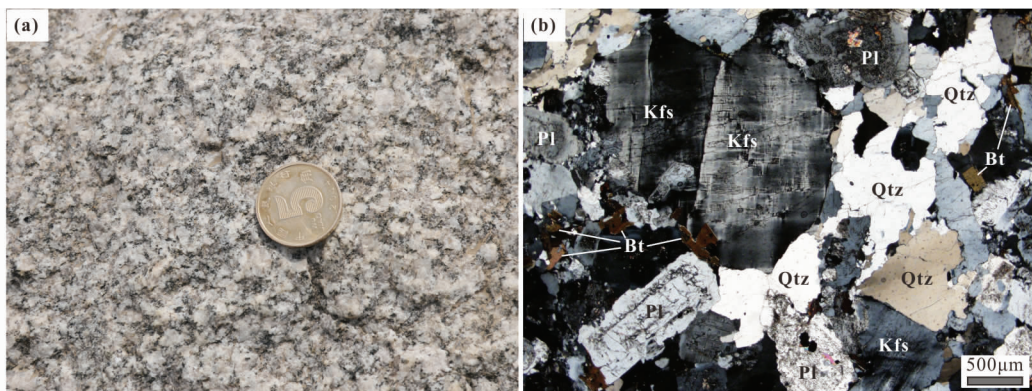


图3 石山岩体测试样品的野外照片(a)及镜下照片(b)

Kfs-钾长石; Pl-斜长石; Qtz-石英; Bt-黑云母

Fig. 3 Macroscopic photograph (a) and microscopic photograph (b) of the samples from Shishan pluton

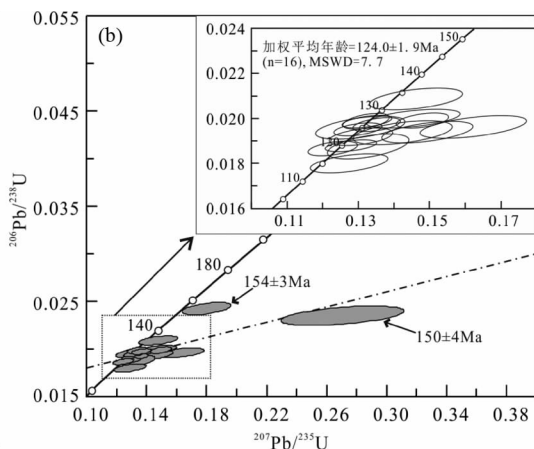
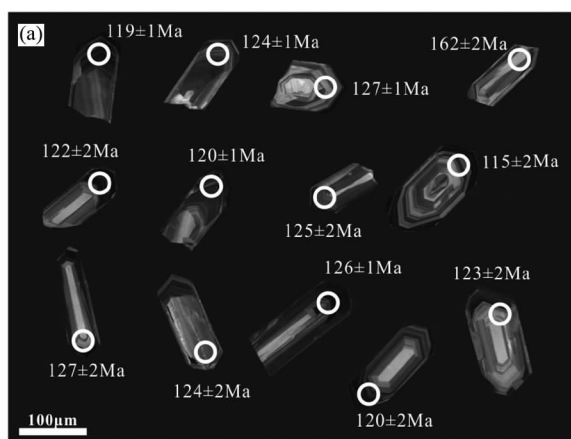


图4 石山岩体部分锆石 CL 图像(a)和锆石 U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig. 4 CL images of the selected zircons (a) and zircon U-Pb concordant diagram (b) for the Shishan pluton

## 4 实验方法及结果

### 4.1 实验方法

#### 4.1.1 锆石 U-Pb 同位素测年

样品经过破碎、浮选和电磁选方法进行分选,之后在镜下挑选得到锆石。在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行锆石制靶、透射光、反射光及阴极发光(CL)照片采集和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及微量元素测定。实验仪器为 Agilent 7500a ICP-MS,实验过程中采用高纯度 He 作为剥蚀物质载气,硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610,锆石标样为 91500。具体测试步骤和数据处理方法见参考文献(Liu *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2011)。年龄计算跟协和图的绘制采用标准程序 Isoplot 3.0(Ludwing, 2003)。

#### 4.1.2 锆石 Hf 同位素分析

在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的基础上,选取单颗粒锆

石进行 Hf 同位素测定。锆石微区原位 Lu-Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。使用仪器为 Nu Plasma 型 MC-ICP-MS,激光剥蚀系统为 193nm ArF 准分子激光器的 GeoLas 2005,以标准锆石 MON-1、GJ-1、91500 作为外标。具体分析方法和仪器参数详见 Yuan *et al.* (2008)。

#### 4.1.3 全岩主量及微量元素分析

全岩的主量元素和微量元素分析在广州澳实矿物实验室完成。主量元素分析采用 X 射线荧光光谱分析,样品与硼酸锂混合加热熔融,冷却后进行 X 荧光分析。微量元素分析则是将经过熔融、冷却后的样品采用 HNO<sub>3</sub> + HCl<sub>3</sub> 进行溶解,之后用 ICP-MS 分析含量。

## 4.2 分析结果

### 4.2.1 锆石 U-Pb 年龄

石山岩体中(样品 L1301)获得锆石多为环带清晰、晶型较好的岩浆锆石,少数岩浆锆石的核部为椭圆形的变质核(图 4a)。测试样品中有 16 颗锆石的年龄在协和图上很集

表 1 石山岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of Shishan pluton

测点号	U/Th	同位素比值						年龄 (Ma)			
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
1301-1	0.9	0.0478	0.0018	0.1231	0.0045	0.0186	0.0002	118	4	119	1
1301-2	1.0	0.0481	0.0017	0.1302	0.0045	0.0195	0.0002	124	4	124	1
1301-3	1.3	0.0537	0.0018	0.1481	0.0049	0.0199	0.0002	140	4	127	1
1301-4	0.9	0.0500	0.0024	0.1309	0.0059	0.0191	0.0003	125	5	122	2
1301-5	1.0	0.0930	0.0102	0.2703	0.0273	0.0235	0.0007	243	22	150	4
1301-6	0.9	0.0550	0.0036	0.1791	0.0107	0.0242	0.0004	167	9	154	3
1301-7	1.6	0.0490	0.0018	0.1278	0.0047	0.0187	0.0002	122	4	120	1
1301-8	1.3	0.0491	0.0029	0.1304	0.0082	0.0195	0.0003	124	7	125	2
1301-9	0.7	0.0524	0.0032	0.1275	0.0071	0.0179	0.0003	122	6	115	2
1301-10	0.6	0.0535	0.0032	0.1456	0.0087	0.0199	0.0003	138	8	127	2
1301-11	1.4	0.0574	0.0036	0.1506	0.0089	0.0195	0.0003	117	10	123	2
1301-12	1.2	0.0498	0.0016	0.1352	0.0044	0.0197	0.0002	129	4	126	1
1301-13	1.4	0.0483	0.0016	0.1326	0.0046	0.0198	0.0002	126	4	126	1
1301-14	1.3	0.0487	0.0016	0.1323	0.0043	0.0198	0.0002	126	4	127	1
1301-15	2.0	0.0538	0.0033	0.1331	0.0076	0.0187	0.0004	127	7	120	2
1301-16	0.9	0.0512	0.0029	0.1464	0.0087	0.0209	0.0003	139	8	133	2
1301-17	1.1	0.0554	0.0038	0.1425	0.0092	0.0193	0.0004	135	8	123	2
1301-18	1.1	0.0614	0.0039	0.1624	0.0098	0.0196	0.0003	128	11	123	2

表 2 石山岩体锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Hf isotopic data for Shishan pluton

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DMI}}(\text{Hf})$ (Ma)	$t_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
L1301-01	119	0.0336	0.0013	0.282043	0.000019	-25.8	-23.3	0.7	1714	2152	-0.96
L1301-02	124	0.0384	0.0015	0.281964	0.000019	-28.6	-26.0	0.7	1834	2291	-0.96
L1301-03	127	0.0497	0.0018	0.281991	0.000018	-27.6	-25.0	0.7	1813	2244	-0.94
L1301-04	122	0.0472	0.0018	0.281989	0.000018	-27.7	-25.2	0.6	1815	2249	-0.95
L1301-07	120	0.0549	0.0021	0.281978	0.000017	-28.1	-25.6	0.6	1846	2269	-0.94
L1301-08	125	0.0494	0.0020	0.282039	0.000023	-25.9	-23.3	0.8	1752	2160	-0.94
L1301-09	115	0.0552	0.0020	0.281976	0.000017	-28.2	-25.8	0.6	1843	2274	-0.94
L1301-10	127	0.0416	0.0016	0.282028	0.000022	-26.3	-23.6	0.8	1748	2176	-0.95
L1301-11	123	0.0318	0.0012	0.282043	0.000018	-25.8	-23.2	0.6	1710	2150	-0.96
L1301-12	126	0.0148	0.0005	0.282121	0.000018	-23.0	-20.3	0.6	1574	2009	-0.98
L1301-13	126	0.0467	0.0016	0.281979	0.000021	-28.0	-25.4	0.7	1821	2264	-0.95
L1301-14	127	0.0415	0.0014	0.282014	0.000022	-26.8	-24.2	0.8	1760	2202	-0.96
L1301-15	120	0.0725	0.0029	0.281951	0.000021	-29.0	-26.7	0.7	1924	2321	-0.91
L1301-16	133	0.0650	0.0024	0.282025	0.000022	-26.4	-23.7	0.8	1790	2183	-0.93
L1301-17	123	0.0265	0.0009	0.282050	0.000025	-25.5	-22.9	0.9	1687	2136	-0.97

注:测点号与表 1 对应

中,加权平均为  $124 \pm 1.9\text{Ma}$  (图 4b, 数据见表 1), 代表石山岩体的成岩时间。2 粒锆石年龄为  $150 \pm 4\text{Ma}$  和  $154 \pm 3\text{Ma}$ , 明显与研究区中-晚侏罗世岩浆活动时间一致, 且在协和图上很分散。这一现象可能是早白垩世岩浆演化过程中熔融早期形成的岩脉或挑选锆石时混入其它样品的锆石颗粒引起的。

#### 4.2.2 锆石 Hf 同位素

样品 L1301 早白垩世锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值  $0.281951 \sim 0.282121$ ,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-26.7 \sim -20.3$ , 一阶段模式年龄  $t_{\text{DMI}}$

$= 1574 \sim 1924\text{Ma}$ , 两阶段模式年龄  $t_{\text{DM2}} = 2009 \sim 2321\text{Ma}$ , 具体数据见表 2。

#### 4.2.3 全岩主量及微量元素特征

石山岩体的样品中  $\text{SiO}_2$  的含量为  $71.12\% \sim 76.11\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量  $13.03\% \sim 14.57\%$ ,  $\text{MgO}$  含量  $0.15\% \sim 0.45\%$ , 全碱 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ) 含量  $8.42\% \sim 8.74\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值为  $0.81 \sim 1.28$ , 上述特征表现出岩石具有亚碱性系列岩浆的特点(具体数据见表 3)。样品投影在  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  图解上的高钾钙碱性系列区域内(图 5a), 在  $A/\text{CNK-A}/\text{NK}$  图解上投影在

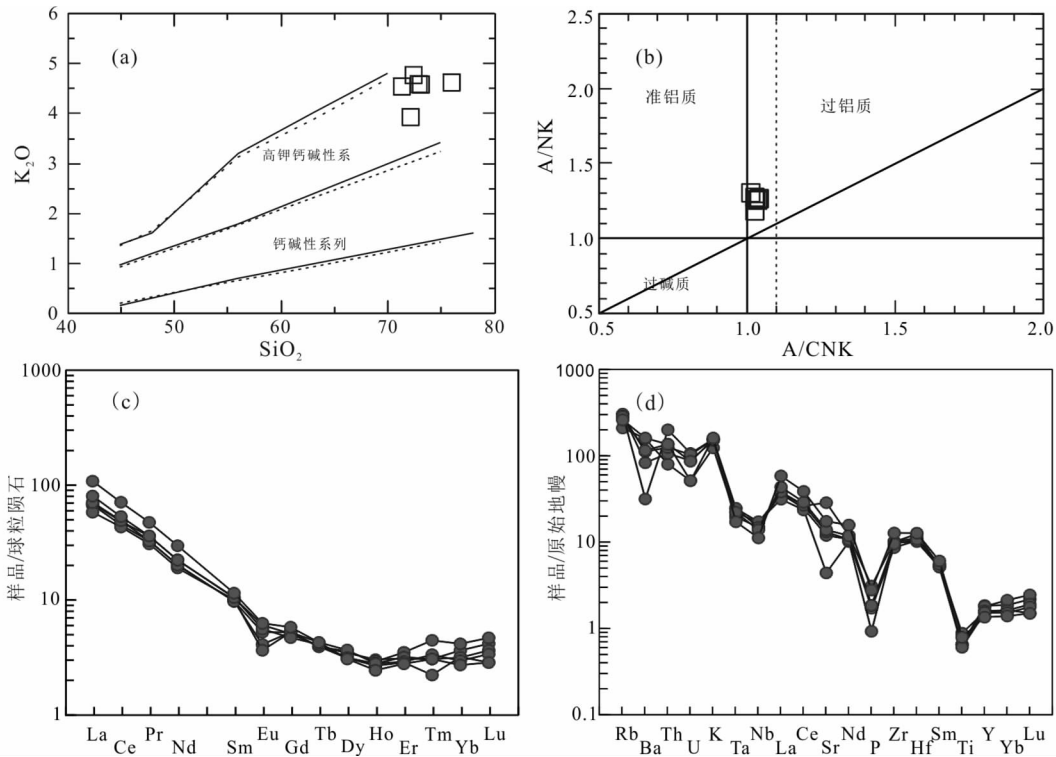


图5 石山岩体花岗岩地球化学图解

(a)  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解 (Peccerillo and Taylor, 1976; Middlemost, 1985); (b)  $A/\text{CNK}$ - $A/\text{NK}$  图解 (Maniar and Piccoli, 1989); (c) 稀土元素配分图解 (球粒陨石标准化值引自 Boynton, 1984); (d) 微量元素蛛网图 (原始地幔标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Geochemical diagrams of the granite in Shishan area

弱过铝质岩石区域内 (图 5b)。样品中富集轻稀土元素 (LREEs), 亏损重稀土元素 (HREEs) (图 5c)。稀土元素配分图解中 Eu 显示出较弱的负异常,  $\delta\text{Eu}$  值 0.48 ~ 0.78。微量元素蛛网图显示富集 Ba、Rb、K、Sr 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 不相容元素 Th 较富集 (图 5d)。

## 5 早白垩世伸展变形组构及岩浆组构

### 5.1 围岩剪切变形组构

医巫闾山地区中-晚侏罗世和早白垩世的两期构造活动都在区内形成了相应的韧性剪切带, 发育具有各自特征的变形组构 (图 2; 李刚等, 2012)。

早期构造作用发生在中部地壳的角闪岩相环境下, 形成了一系列的中、高温变形组构 (李刚等, 2012)。该期次构造作用形成了 NE-SW 向延伸的韧性剪切带, 并发育 NE-SW 向倾伏的矿物拉伸线理, 根据旋转残斑、S-C 组构、对称褶皱等组构判断岩层上盘向 SW 剪切滑移 (李刚等, 2010, 2012; Li *et al.*, 2013; Lin *et al.*, 2013a, b)。这些中、高温的变形组构主要发育在研究区的中部和东部。

晚期构造作用发生在浅部地壳的绿片岩相环境下, 在医

巫闾山的西侧形成了瓦子峪拆离断层及其下盘的低温韧性剪切带 (图 2; Darby *et al.*, 2004; 李刚等, 2012, 2013; Lin *et al.*, 2013b)。这条低温韧性剪切带宽 1 ~ 5 km, 是晚期低温变形组构叠加、改造早期高温变形组构的产物, 在低温韧性剪切带中保留有未被完全改造的早期高温变形组构是这一结论的有力证据 (李刚等, 2012, 2013)。瓦子峪拆离断层带内形成断层泥、构造角砾岩、微角砾岩, 下盘低温剪切带内形成构造片岩或低温糜棱岩 (李刚等, 2012, 2013)。典型的变形组构包括矿物定向排列, 长石脆性破裂, 石英形成亚颗粒和亚颗粒旋转重结晶, 黑云母退变质生成白云母 (李刚等, 2012, 2013)。低温剪切带也具有 NE-SW 向延伸的特点, 但是剪切带内发育的线理普遍向 NWW 或 NW 倾伏, 岩层中发育的旋转残斑和 S-C 组构显示上盘向 NW 滑移 (Darby *et al.*, 2004; 李刚等, 2013; Lin *et al.*, 2013b)。虽然早白垩世低温伸展变形主要影响了医巫闾山的西部, 但是在医巫闾山地区的中部和东部仍然发育少量倾伏向 NW 或 SE 的拉伸线理, 而且早白垩世的伸展作用在医巫闾山岩体内形成了 NW 向的地磁组构 (Lin *et al.*, 2013a)。这些组构表明早白垩世的伸展作用对医巫闾山地区的中部和东部也有一定程度的影响, 只是在西部表现的比较强烈和明显, 而中部和东部相对较弱。

表3 石山岩体花岗岩样品主量元素 (wt%) 与微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 分析结果Table 3 Major (wt%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) elements composition for the granites from Shishan pluton

样品号	L1301	L1303	L1505	L1506	L1507	L1508
SiO <sub>2</sub>	71.12	73.48	76.11	73.16	73.03	72.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.57	13.52	13.03	14.15	14.33	14.47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.75	1.34	1.31	1.45	1.36	1.77
CaO	1.48	0.97	0.79	1.16	1.23	1.35
MgO	0.45	0.26	0.15	0.26	0.25	0.36
K <sub>2</sub> O	3.69	4.51	4.66	4.62	4.63	4.81
Na <sub>2</sub> O	4.73	3.92	3.79	4.00	4.07	3.93
TiO <sub>2</sub>	0.19	0.14	0.14	0.14	0.13	0.17
MnO	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.037	0.02	0.04	0.04	0.06
LOI	0.63	0.64	0.14	0.30	0.28	0.39
Total	98.72	98.86	100.18	99.32	99.38	99.90
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	8.42	8.43	8.45	8.62	8.70	8.74
A/CNK	1.01	1.03	1.02	1.03	1.03	1.02
A/NK	1.24	1.19	1.16	1.22	1.22	1.24
V	12.00	7.00	7.00	11.00	11.00	14
Cr	20.00	<10	10	10	20	20
Rb	133	191	191	181	179	164
Sr	598	250	92.2	274	290	365
Y	7.0	8.3	8.1	7.2	6.9	6.1
Zr	113	96	112	110	106	142
Nb	10.5	11.9	12.2	10.5	9.8	7.9
Ba	1095	576	219	772	801	1115
La	25.4	24.7	21.4	26.0	29.6	39.8
Ce	46.5	43.3	41.5	47.2	51.1	68.1
Pr	4.95	4.49	4.24	4.50	4.97	6.52
Nd	16.0	14.5	13.6	14.4	15.9	21.2
Sm	2.43	2.26	2.34	2.27	2.45	2.67
Eu	0.53	0.36	0.32	0.46	0.49	0.55
Gd	1.57	1.62	1.62	1.62	1.45	1.79
Tb	0.23	0.23	0.23	0.25	0.24	0.25
Dy	1.20	1.33	1.37	1.41	1.21	1.18
Ho	0.23	0.26	0.25	0.24	0.24	0.21
Er	0.72	0.78	0.88	0.80	0.73	0.70
Tm	0.08	0.11	0.16	0.11	0.12	0.11
Yb	0.80	0.91	1.04	0.79	0.74	0.68
Lu	0.11	0.16	0.18	0.14	0.13	0.11
Hf	3.4	3.2	3.8	3.1	3.3	3.9
Ta	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.7
Th	6.73	8.96	16.85	10.55	11.50	11.45
U	1.07	1.83	2.22	2.15	1.80	1.07
ΣREE	100.8	95.01	89.13	100.2	109.4	143.9
LREE	95.81	89.61	83.4	94.83	104.5	138.8
HREE	4.94	5.4	5.73	5.36	4.86	5.03
LREE/HREE	19.4	16.6	14.6	17.7	21.5	27.6
(La/Yb) <sub>N</sub>	22.8	19.5	14.8	23.6	28.7	42.0
δEu	0.78	0.55	0.48	0.70	0.73	0.72

## 5.2 岩体中的变形及岩浆组构

石山岩体的中部和东部构成了岩体的主体部位,基本没有发生剪切变形。岩体主体部位的岩浆流动叶理十分发育,但是岩浆线理不明显。虽然,由于风化作用较强导致部分天然露头上难以观测到岩浆组构;但是,在人工采坑内及部分天然露头上测量的岩浆组构基本可以反映岩体内岩浆组构的特点。岩浆叶理的走向大致平行于岩体边界呈环状分布,岩浆叶理的倾角近水平、普遍在10°左右,多数岩浆叶理向围岩倾斜,局部的岩浆叶理向岩体内部倾斜(图6a)。与岩浆叶理相比,岩浆线理并不十分发育,已测量到的线理具有向W倾伏的特点(图6a)。野外观察到岩体顶部边界截切围岩剪切叶理,同时岩浆侵入围岩形成平行或切割围岩叶理的岩脉(图7a, b),这些岩脉中不发育或发育微弱的变形和岩浆组构。这一特点显示岩浆就位时围岩没有剪切滑移或剪切滑移很弱,围岩中的剪切叶理是早期变形的产物。这些剪切叶理作为薄弱面为岩浆运移提供通道。同一露头上的花岗岩体内发育较弱的岩浆叶理,岩浆叶理产状与岩体边界近平行,但与剪切叶理斜交。上述特点表明在岩浆就位过程中,主体部位的岩浆以垂向的运移和对围岩的侵蚀及膨胀挤压为主,NWW向的伸展滑移使岩浆具有向西流动的趋势,但是并不明显。

岩体西部呈狭窄的条带,岩石中矿物的粒度比东部细,岩浆叶理和线理比主体部位明显。回兰-英明山一线为粗粒花岗岩与细粒花岗岩过渡带,由此向西至柳条沟附近完全变为细粒花岗岩。镜下观察发现主体部位矿物颗粒大且长石多呈自形、半自形(图3b、图7c);而西部岩石的矿物均呈半自形、他形,长石蠕英结构十分普遍,但矿物颗粒未变形(图7d)。西部的岩浆叶理多向西倾斜,靠近围岩的岩浆叶理走向与围岩边界近平行,岩浆线理倾伏向NW(图6a),表明岩浆具有向西流动的特点,且岩浆流动性比主体部位强。

回兰-孙家峪一线,细粒花岗岩呈弧形条带侵入围岩,花岗岩条带的延伸趋势与围岩糜棱叶理走向相近(图6a),指示岩浆就位受围岩剪切作用控制,岩浆沿着围岩的糜棱叶理向西运移形成弧形花岗岩条带。柳条沟-王家窝铺一线,细粒花岗岩呈EW向延伸的条带,花岗岩切割围岩剪切叶理。石山岩体南北两侧均发育近东西向的河谷,王家窝铺附近发育近东西向的断层和构造破碎带(图6b),这些构造现象暗示近东西向的花岗岩条带很可能是沿着近东西向的断裂带运移形成的,这些断裂带形成于早白垩世之前。在冯山子北西约2km处,观察到细粒花岗岩呈岩株状穿切了发生褶皱的围岩,在岩株与围岩接触面上岩浆沿剪切叶理贯入两侧围岩并形成岩脉(图7e)。与主体部位(图7a, b)相比,这些岩脉中的岩浆组构十分发育,岩浆叶理与围岩糜棱叶理平行,表明岩浆就位与围岩剪切变形同时进行,且西部岩浆就位表现为平行糜棱叶理和穿切糜棱叶理两种方式。在孙家峪-王家窝铺一带,花岗岩延伸方向与围岩糜棱叶理走向协调一致(图6b),

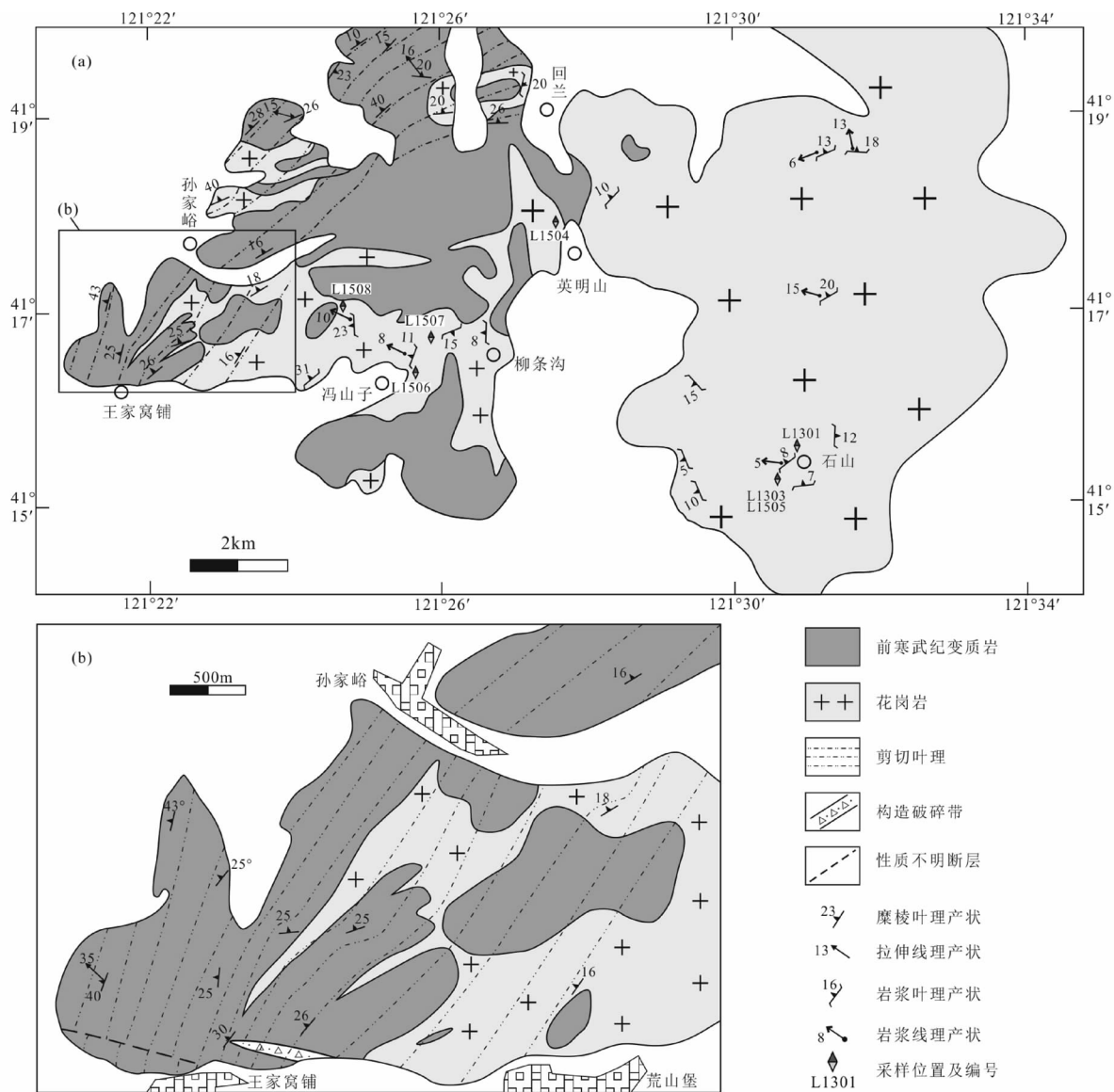


图6 石山岩体构造纲要图(辽宁省地质勘查局,1995<sup>①</sup>修改)

Fig. 6 Simplified structural map of the Shishan pluton

也指示了岩浆就位受剪切作用的控制。岩体西侧边缘,王家窝铺-孙家峪-回兰一线的花岗岩见有糜棱岩化现象,岩体中糜棱叶理与围岩糜棱叶理产状一致(图6a),表明岩浆结晶过程中受剪切应力作用发生糜棱岩化。

在细粒花岗岩的边缘形成了许多伟晶岩,这些伟晶岩呈条带分布在细粒花岗岩边部或呈岩脉贯入围岩(图7f, g)。伟晶岩定向但不变形,其中的岩浆叶理与围岩剪切叶理平行(图7f, g)。这些特点表明伟晶岩是岩浆在围岩剪切作用的引导下沿着细粒花岗岩的边缘运移的产物,且此时已到伸展

变形的晚期,剪切速率较低,岩浆才有充分的时间结晶。伟晶岩与围岩接触部位多存在一条宽3~50mm的细粒伟晶岩带(图7f, g),笔者认为这种细粒带不是冷凝边,因为此时围岩在先前就位的岩浆的烘烤下已经具有较高的温度。所以这一细粒伟晶岩条带应该是岩浆在围岩剪应力作用下,流速相对较快导致的矿物结晶粒度较细。局部仍可观察到伟晶岩脉被细粒花岗岩细脉切割(图7g),表明伟晶岩的岩浆就位时细粒花岗岩并未完全结晶,是两个连续的岩浆演化阶段。

① 辽宁省地质勘查局. 1995. 凌海市幅1:5万地质图



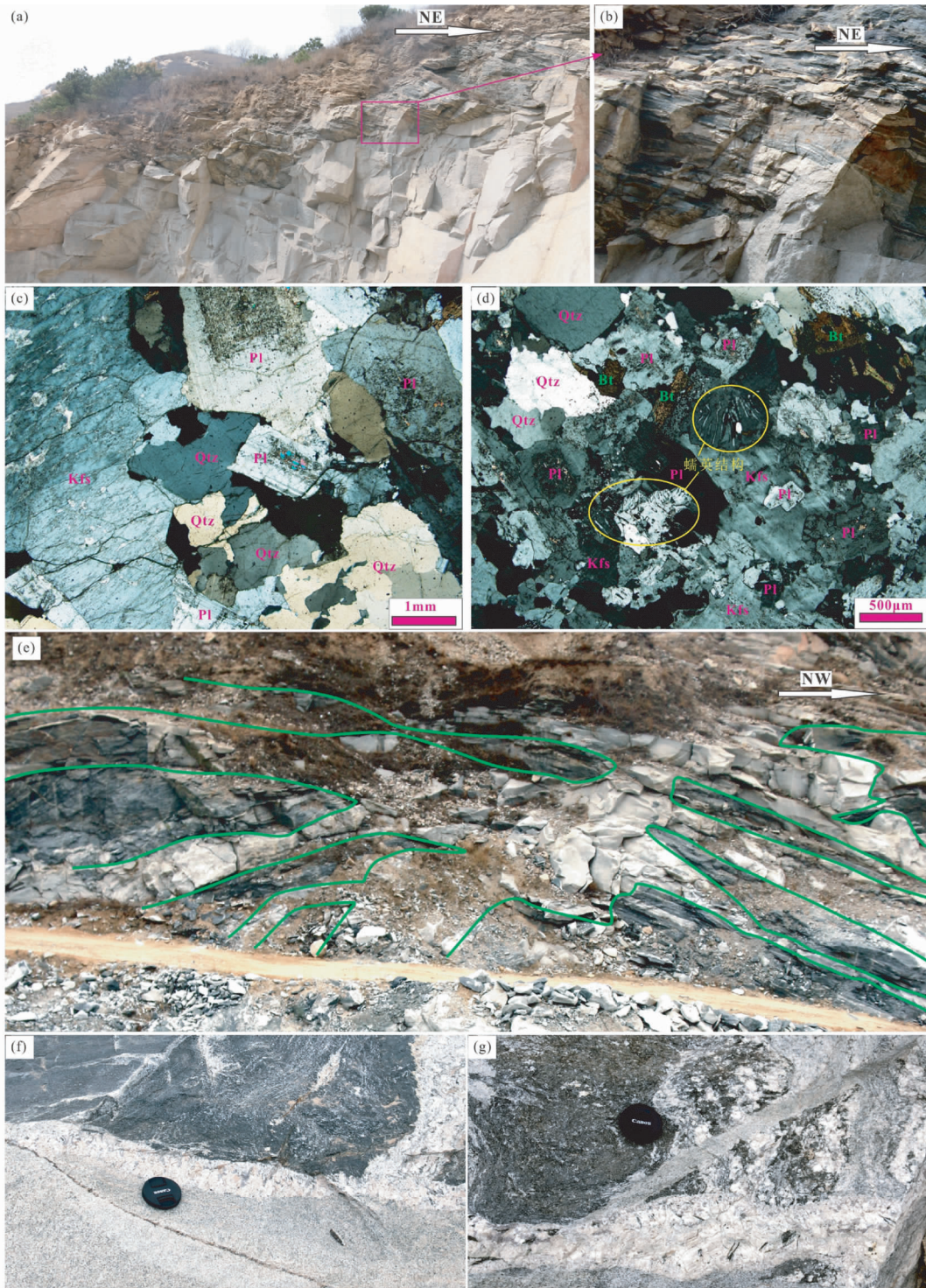


图7 花岗岩及围岩宏观和微观照片

(a) 花岗岩与顶部围岩接触面; (b) 花岗岩沿围岩叶理就位; (c) 粗粒花岗岩镜下特征; (d) 细粒花岗岩镜下特征; (e) 细粒花岗岩株截断早期褶皱叶理, 同时形成平行围岩叶理的岩脉, 绿色线条表示围岩与花岗岩界线; (f) 细粒花岗岩边缘的伟晶岩条带, 伟晶岩脉平行围岩叶理; (g) 细粒花岗岩脉截切伟晶岩脉. Kfs-钾长石; Pl-斜长石; Qtz-石英; Bt-黑云母

Fig. 7 Photos of the macro- and micro-structure from granites and wall rocks

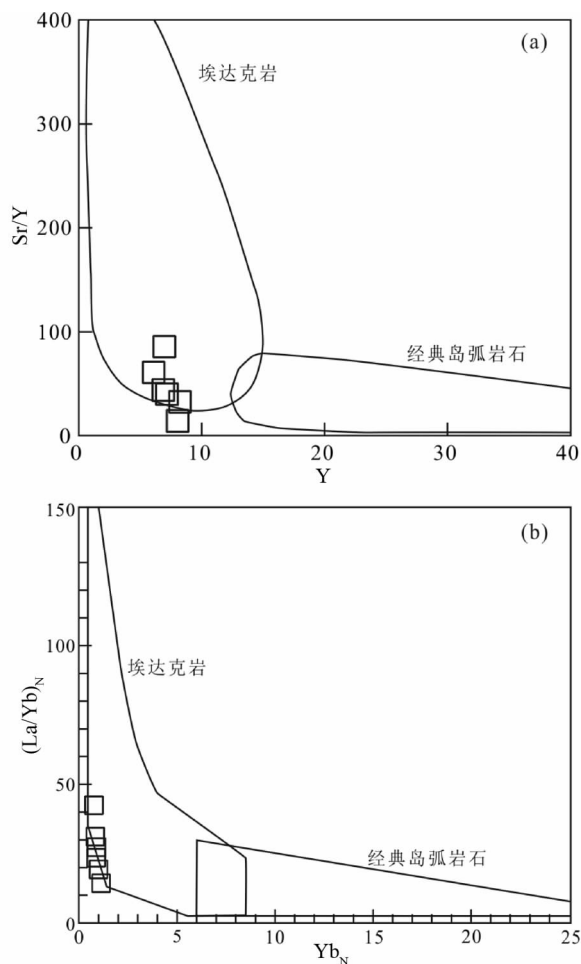


图8 石山岩体花岗岩的 Sr/Y-Y 图解 (a) 和  $(La/Yb)_N$ - $Yb_N$  图解 (b)

Fig. 8 Plots of Sr/Y vs. Y (a) and  $(La/Yb)_N$  vs.  $Yb_N$  (b) for granites from Shishan pluton

## 6 讨论

### 6.1 构造-岩浆活动时间

前人对医巫闾山地区低温韧性剪切带内的白云母做了大量 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素测年工作,显示构造变形时间为 133 ~ 107Ma (Darby *et al.*, 2004; 李刚等, 2012, 2013; Lin *et al.*, 2013b)。石山岩体中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄 123 ~ 125Ma (Darby *et al.*, 2004; 吴福元等, 2006), 本文获得加权平均为  $124 \pm 1.9\text{Ma}$ 。上述资料表明石山岩体是早白垩世伸展变形的同构造岩体,且岩体活动发生在构造变形的中、晚期。

### 6.2 岩浆来源

岩石中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{Na}_2\text{O}$  含量较高,轻稀土 (LREEs)、重稀土 (HREEs) 高度分异, Sr 含量较高而 Y、Yb 含量很低,显示

出埃达克岩的特点 (Defant and Drummond, 1990; 图 8)。普遍认为埃达克岩形成于俯冲大洋板片的部分熔融 (Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999), 或者由玄武质岩浆分离结晶形成 (Castillo *et al.*, 1999), 或形成于加厚的铁镁质地壳的部分熔融 (Atherton and Petford, 1993; Huang *et al.*, 2009)。石山岩体属弱过铝质并具有高钾钙碱性的特点 (图 5a, b) 与俯冲大洋板片部分熔融形成的埃达克岩不同 (Defant and Drummond, 1990; Huang *et al.*, 2009)。Th/U 比值较高和 Mg、Cr 含量较低的特点显示岩浆不是来源于玄武质岩浆的分离结晶 (Martin, 1999; Wang *et al.*, 2006)。

岩浆的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及碱性组分含量较高,而  $\text{Fe}_2\text{O}_3^+$  和 MgO 含量较低,在 A/CNK-A/NK 图解上投影在弱过铝质区域。这些特征显示岩浆来源于地壳物质的部分熔融 (Barbarin, 1999; Frost *et al.*, 2001; Schneider *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2015)。岩浆锆石中的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值均为负值 (-26.7 ~ -20.3), Hf 的两阶段模式年龄范围为 2.0 ~ 2.3Ga, 说明岩浆来源于华北陆块古老岩石的部分熔融 (Yang *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2014b)。

综上所述,石山岩体的岩浆来源于华北陆块加厚下地壳的部分熔融。

### 6.3 岩浆运移、就位机制

同位素年代学研究表明医巫闾山地区早白垩世伸展变形与石山岩体就位的时间相同。岩体中发育的多数岩浆线理向 W-NW 倾伏,与早白垩世伸展滑移方向基本一致,说明岩浆的运移受到伸展滑移的影响。根据岩体及围岩的宏观及围岩变形特点可以将石山岩体就位过程大致分为三个阶段。

#### 6.3.1 岩浆垂向运移和底劈、膨胀阶段 (D1)

地球化学分析结果显示岩浆源区为下部地壳,而围岩变形特点显示岩浆就位浅部地壳 (李刚等, 2012, 2013), 表明岩浆存在由深部至浅部的运移过程。Lin *et al.* (2013a) 通过布格重力异常解译得出石山岩体中部和东部的厚度最大而西部厚度很小,表明石山岩体的岩浆通道位于岩体中部和东部。

当岩浆上升至浅部地壳时,岩浆房所在部位 (即岩体中部和东部) 的围岩剪切滑移较弱,因此岩浆侧向流动性较差。在这种情况下,岩浆以底劈和气球膨胀的方式扩张岩浆房 (图 9)。侧向膨胀作用使岩浆在本阶段以平面应变为主,导致岩体具有岩浆叶理十分发育而岩浆线理发育较弱 ( $S > L$ ) 以及岩浆叶理平行岩体边界展布的特点,而主体部位的岩体在平面上则呈近圆形。岩体主体部位的岩浆叶理倾向围岩、倾角普遍较小 (图 6a), 而且可以观察到花岗岩体顶部的太古代片麻岩 (图 7a, b), 说明岩体抬升高度和剥蚀深度都较小, 出露地表的是岩体的上部。

#### 6.3.2 岩浆向西运移及细粒花岗岩形成阶段 (D2)

当岩浆房扩大到一定程度时,西侧的岩浆与正在活动的

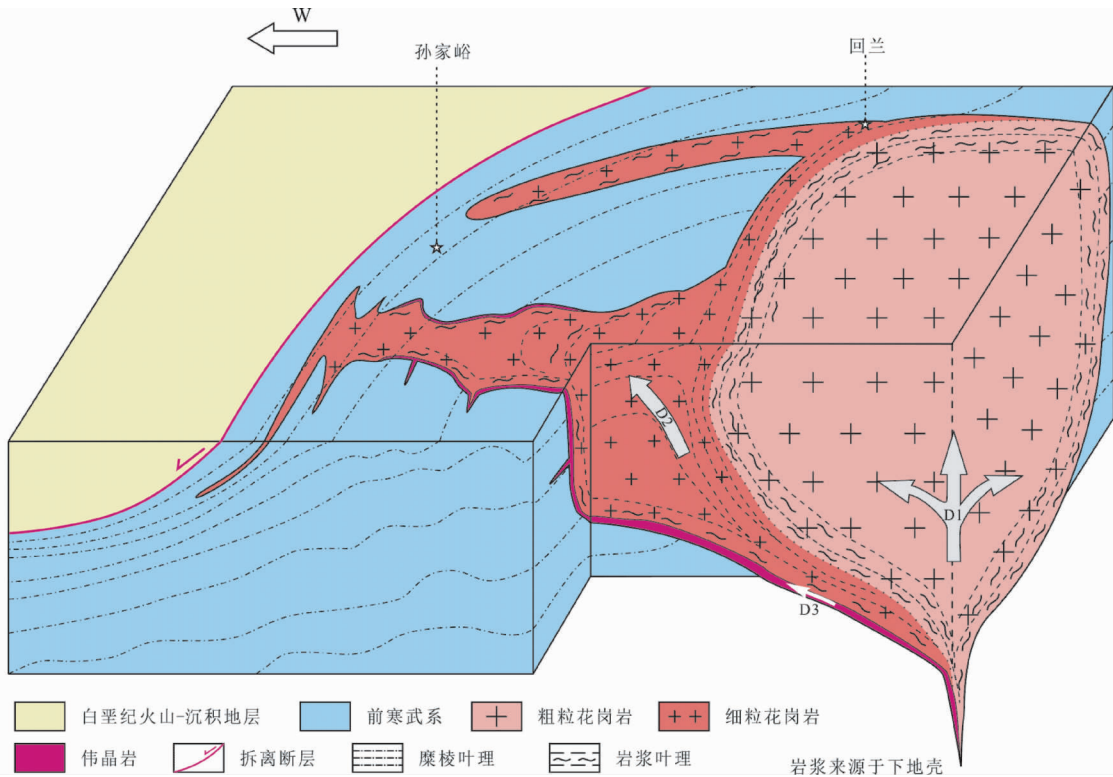


图9 早白垩世岩浆就位模式图

Fig. 9 Sketch map of Early Cretaceous magma emplacement in Yiwulüshan area

低温剪切带相接触, 围岩的伸展滑移作用开始影响并控制岩浆向西运移(图9)。围岩的糜棱叶理作为薄弱面容易被岩浆贯入, 而围岩的剪切滑移则引导岩浆沿着糜棱叶理流动, 形成了回兰-孙家峪的弧形岩浆条带(图6a、图9)。伸展作用使早期形成的近东西向断裂带再次活动, 为岩浆运移提供了新的通道。由于再次活动的断裂带和围岩剪切滑移对岩浆的引导作用, 形成了柳条沟至王家窝铺的东西向花岗岩条带(图6a、图9)。这两条花岗岩条带的宏观及围岩组构显示岩浆流动方向与早白垩世伸展滑移方向一致, 岩石中矿物颗粒细小。当岩浆运移至西侧靠近拆离断层的部位时, 由于围岩剪切作用非常强烈, 导致这一区域的花岗岩在就位过程中形成了与围岩糜棱叶理产状一致的花岗岩脉, 且花岗岩发生糜棱岩化(图6a、图9)。

### 6.3.3 伟晶岩形成阶段(D3)

在岩浆演化的最后阶段形成了花岗质伟晶岩, 这些伟晶岩的产出形态及岩浆组构显示本阶段围岩仍有一定程度的伸展滑移。围岩的持续滑动为岩浆运移提供通道, 此时细粒花岗岩的岩浆已经开始冷却结晶, 因而岩浆流动性较差。在这种情况下, 伟晶岩的岩浆沿着细粒花岗岩的边缘流动, 在适当的部位贯入围岩叶理形成岩脉(图9)。围岩的剪切滑移在伟晶岩边部形成了细粒的条带, 但是这些细粒条带中的矿物颗粒仍然比前几个阶段形成的花岗岩中矿物颗粒大(图7f, g), 表明围岩的伸展滑移进入了后期变形最弱的阶段。

花岗质伟晶岩的岩浆来源尚不明确, 可能是源区岩浆在运移过程中结晶分异的产物, 也可能由细粒花岗岩在结晶过程中分异而出。

## 6.4 地质意义

### 6.4.1 小型褶皱成因

关于医巫闾山地区众多轴向NE的小型褶皱的成因及形成时代存在争议, 李刚等(2012, 2013)认为中-晚侏罗世和早白垩世两期强烈伸展变形之间短暂的挤压作用形成了这些褶皱, Lin *et al.* (2013b)则认为早白垩世伸展变形后的隆升-重力拖曳是这些褶皱的成因。在本文的研究过程中, 发现早白垩花岗岩破坏或贯入了已经褶皱的围岩(图7e), 表明褶皱作用形成于早白垩世之前, 此证据支持前一种观点。

### 6.4.2 伸展作用对岩浆就位机制的控制

瓦子峪拆离断层倾向NW, 石山岩体位于拆离断层下盘的东部。早白垩世的伸展变形对研究区中部和东部的影响较弱, 而石山岩体的岩浆房及岩浆上升通道正处于这一区域。因此, 瓦子峪拆离断层及同期伸展变形在岩浆由深至浅的垂向运移和主体岩浆房的形成过程中(D1)起到的作用比较有限。在石山岩体岩浆就位的晚期, 当岩浆与强烈活动的剪切带和再次发生活动的断裂带接触时, 岩浆沿着剪切叶理和断裂带向西运移形成了西部的花岗岩条带和花岗岩脉。

北京西山的房山花岗岩体同样形成于华北地区早白垩

世的区域伸展背景下,研究表明该岩体就位的过程中拆离断层起着重要的控制作用(Yan *et al.*, 2011)。岩体就位的早期阶段,岩浆以垂向上升和底劈作用为主;晚期阶段,岩浆的侧向膨胀对围岩的挤压作用使早期形成的拆离断层再次活动,岩浆则沿着倾向 SE 的拆离断层运移,最终形成了倾向 SE 的花岗岩体(Yan *et al.*, 2011)。

对比两个伸展背景下同构造花岗岩体的特点可以发现,房山岩体和石山岩体就位虽然都伴随着围岩的构造变形,但是构造作用与岩浆作用的相互关系并不相同。房山岩体的岩浆膨胀作用使围岩中已经存在的褶皱进一步挤压变形,并且引起早期形成的断层再次活化为岩浆的侧向运移提供通道。石山岩体在瓦子峪拆离断层活动的中-晚期就位,石山岩体岩浆活动的早期阶段与房山岩体相似——以垂向运移和底劈作用为主;而晚期阶段,当岩浆房扩展至与强烈活动的剪切带和再活化的断裂带接触时,岩浆沿着剪切带和断裂带向西运移形成了西部的岩墙和弧形岩脉(图 9)。与房山岩体不同,石山岩体围岩的剪切滑移面和先存断裂带的再活化受控于伸展变形而不是岩浆活动。

虽然在岩浆就位的晚期,房山岩体和石山岩体中伸展变形和拆离断层对岩浆运移的影响程度和方式各不相同,但岩浆活动的早期都存在一个由深向浅的岩浆运移过程。

上述研究表明,同伸展岩浆就位时围岩构造活动的程度、剪切变形方式和断层性质对岩体的最终形态起到决定性的作用,但是下部地壳的部分熔融及岩浆向上运移的过程同浅部地壳的伸展变形没有必然联系。华北地区晚中生代的区域伸展应力场和岩石圈减薄(刘俊来等, 2008, 2009)是下地壳部分熔融以及岩浆向浅部地壳运移的动因,浅部地壳的伸展只是为岩浆就位提供适当的空间并控制着岩浆就位的具体过程。

## 7 结论

(1) 石山岩体的岩浆来源于华北陆块加厚下地壳在区域伸展背景下的部分熔融。

(2) 石山岩体就位可分为三个阶段,伸展变形对早期阶段(D1)的岩浆活动影响较弱,对后期岩浆运移起到控制作用(D2-D3)。

(3) 区域伸展和岩石圈减薄引起了华北陆块下地壳的部分熔融,而浅部地壳的伸展作用仅仅与岩浆就位的具体过程和最终形态密切相关。

**致谢** 两位审稿专家提出的宝贵意见对本文的完善和提高做出了重要贡献,在此表示感谢!

## References

Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas

- from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362(6416): 144 – 146
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605 – 626
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63 – 114
- Castillo PR, Janney PE and Solidum RU. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines; Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33 – 51
- Castro A. 1987. On granitoid emplacement and related structures; A review. *Geologische Rundschau*, 76(1): 101 – 124
- Chen H, Xia QK and Ingrin J. 2015. Water content of the Xiaogulihe ultrapotassic volcanic rocks, NE China; Implications for the source of the potassium-rich component. *Science Bulletin*, 60(16): 1468 – 1470
- Chen L, Liu YS, Hu ZC, Gao S, Zong KQ and Chen HH. 2011. Accurate determinations of fifty-four major and trace elements in carbonate by LA-ICP-MS using normalization strategy of bulk components as 100%. *Chemical Geology*, 284(3–4): 283 – 295
- Darby BJ, Davis GA, Zhang XH, Wu FY, Wilde S and Yang JH. 2004. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwuli Shan, western Liaoning Province, Northeast China. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 145 – 155
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662 – 665
- Du JJ, Ma YS, Zhao Y and Wang YB. 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Yiwulüshan granite in western Liaoning and its geological implications. *Geology in China*, 34(1): 26 – 33 (in Chinese with English abstract)
- Frost BR, Barnes CG, Collins WJ, Arculus RJ, Ellis DJ and Frost CD. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033 – 2048
- Huang XL, Xu YG, Lan JB, Yang QJ and Luo ZY. 2009. Neoproterozoic adakitic rocks from Mopanshan in the western Yangtze Craton; Partial melts of a thickened lower crust. *Lithos*, 112(3–4): 367 – 381
- Hutton DHW, Dempster TJ, Brown PE and Decker SD. 1990. A new mechanism of granite emplacement: Intrusion in active extensional shear zones. *Nature*, 343(6527): 452 – 455
- Johnson SE, Fletcher JM, Fanning CM, Vernon RH, Paterson SR and Tate MC. 2003. Structure, emplacement and lateral expansion of the San José tonalite pluton, Peninsular Ranges batholith, Baja California, México. *Journal of Structural Geology*, 25(11): 1933 – 1957
- Li G, Liu ZH, Xu ZY, Dong XJ, Sha Q, Wang WQ, Wang XA and Zhang C. 2010. Evidences of syn-extensional emplacement of Yiwulüshan pluton and its geological significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 971 – 978 (in Chinese with English abstract)
- Li G, Liu ZH, Liu JL, Li YF, Xu ZY and Dong XJ. 2012. Formation and timing of the extensional ductile shear zones in Yiwuli mountain area, western Liaoning Province, North China. *Science China (Earth Sciences)*, 55(5): 733 – 746
- Li G, Liu ZH, Xu ZY, Li SC, Dong XJ and Liu JL. 2013. Crustal thinning during Mesozoic extensional detachment faulting in the Yiwulüshan region, eastern North China Craton. *International Geology Review*, 55(6): 749 – 766
- Li G, Xu ZY, Liu ZH, Li YF, Li SC and Dong XJ. 2013. Early Cretaceous extension of the Yiwulüshan metamorphic core complex. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 938 – 952 (in Chinese with English abstract)
- Lin W, Charles N, Chen Y, Chen K, Faure M, Wu L, Wang F, Li QL, Wang J and Wang QC. 2013a. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulüshan massif, NE China and their

- bearing on the Yinshan-Yanshan orogenic belt: Part II: Anisotropy of magnetic susceptibility and gravity modeling. *Gondwana Research*, 23(1): 78–94
- Lin W, Faure M, Chen Y, Ji WB, Wang F, Wu L, Charles N, Wang J and Wang QC. 2013b. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulüshan massif, NE China and its bearing on the evolution of the Yinshan-Yanshan orogenic belt; Part I: Structural analyses and geochronological constraints. *Gondwana Research*, 23(1): 54–77
- Liu JL, Davis GA, Ji M, Guan HM and Bai XD. 2008. Crustal detachment and destruction of the North China craton: Constraints from Late Mesozoic extensional structures. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 72–81 (in Chinese with English abstract)
- Liu JL, Ji M, Xia HR, Liu ZH, Zhou YS, Yu XQ, Zhang HY and Cheng SH. 2009. Crustal-mantle detachment of the North China craton in Late Mesozoic: Rheological constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1819–1829 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43
- Ludwing KR. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex Version 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 1–70
- Ma YS, Cui SQ, Wu GG, Wu ZH, Zhu DG, Li X and Feng XY. 1999. The structural feature of metamorphic core complex in Yiwulüshan Mountains, West Liaoning. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(4): 385–391 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of American Bulletin*, 101(5): 635–643
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429
- Middlemost EAK. 1985. *Magmas and magmatic rocks*. London: Longman
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81
- Ramsay JG. 1989. Emplacement kinematics of a granite diapir: The Chindamora batholith, Zimbabwe. *Journal of Structural Geology*, 11(1–2): 191–209
- Schneider DA, Edwards MA, Kidd WSF, Zeitler PK and Coath CD. 1999. Early Miocene anatexis identified in the western syntaxis, Pakistan Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 167(3–4): 121–129
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Migmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Turrillot P, Faure M, Martelet G, Chen Y and Augier R. 2011. Pluton-dyke relationships in a Variscan granitic complex from AMS and gravity modelling. Inception of the extensional tectonics in the South Armorican Domain (France). *Journal of Structural Geology*, 33(11): 1681–1698
- Vernon RH, Johnson SE and Melis EA. 2004. Emplacement-related microstructures in the margin of a deformed pluton: The San José tonalite, Baja California, México. *Journal of Structural Geology*, 26(10): 1867–1884
- Wang Q, Xu JF, Jian P, Bao ZW, Zhao ZH, Li CF, Xiong XL and Ma JL. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119–144
- Weinberg RF, Mark G and Reichardt H. 2009. Magma ponding in the Karakoram shear zone, Ladakh, NW India. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1–2): 278–285
- Wu FY, Yang JH, Zhang YB and Liu XM. 2006. Emplacement ages of the Mesozoic granites in southeastern part of the western Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 315–325 (in Chinese with English abstract)
- Yan DP, Zhou MF, Zhao DG, Li JW, Wang GH, Wang CL and Qi L. 2011. Origin, ascent and oblique emplacement of magmas in a thickened crust: An example from the Cretaceous Fangshan adakitic pluton, Beijing. *Lithos*, 123(1–4): 102–120
- Yang JH, Wu FY, Shao JA, Wilde SA, Xie LW and Liu XM. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3–4): 336–352
- Yuan HL, Gao S, Dai MN, Zong CL, Günther D, Fontaine GH, Liu XM and Diwu CR. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247: 100–118
- Zhang BL, Zhu G, Jiang DZ, Chen Y and Hu ZQ. 2011. Evolution of the Yiwulüshan metamorphic core complex and Late Jurassic extensional event in the western Liaoning Province. *Geological Review*, 57(6): 779–798 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Davis GA, Ye H and Wu F. 2014b. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization. *Earth-Science Reviews*, 131: 49–87
- Zhang XH, Mao Q, Zhang HF and Wilde SA. 2008. A Jurassic peraluminous leucogranite from Yiwulüshan, western Liaoning, North China craton: Age, origin and tectonic significance. *Geological Magazine*, 145(3): 305–320
- Zhang XH, Zhang HF, Jiang N and Wilde SA. 2010. Contrasting Middle Jurassic and Early Cretaceous mafic intrusive rocks from western Liaoning, North China craton: Petrogenesis and tectonic implications. *Geological Magazine*, 147(6): 844–859
- Zhang XH, Yuan LL and Wilde SA. 2014a. Crust/mantle interaction during the construction of an extensional magmatic dome: Middle to Late Jurassic plutonic complex from western Liaoning, North China Craton. *Lithos*, 205: 185–207

### 附中文参考文献

- 杜建军, 马寅生, 赵越, 王彦斌. 2007. 辽西医巫闾山花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义. *中国地质*, 34(1): 26–33
- 李刚, 刘正宏, 徐仲元, 董晓杰, 沙茜, 王婉琼, 王兴安, 张超. 2010. 医巫闾山岩体同伸展侵位的证据及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(4): 971–978
- 李刚, 刘正宏, 刘俊来, 李永飞, 徐仲元, 董晓杰. 2012. 医巫闾山伸展型韧性剪切带的形成过程及年代学证据. *中国科学(地球科学)*, 42(6): 879–892
- 李刚, 徐仲元, 刘正宏, 李永飞, 李世超, 董晓杰. 2013. 医巫闾山变质核杂岩早白垩世伸展变形. *岩石学报*, 29(3): 938–952
- 刘俊来, Davis GA, 纪沫, 关会梅, 白相东. 2008. 地壳的拆离作用与华北克拉通破坏: 晚中生代伸展构造约束. *地学前缘*, 15(3): 72–81
- 刘俊来, 纪沫, 夏浩然, 刘正宏, 周永胜, 余心起, 张宏远, 程素华. 2009. 华北克拉通晚中生代壳-幔拆离作用: 岩石流变学约束. *岩石学报*, 25(8): 1819–1829
- 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 吴珍汉, 朱大岗, 李晓, 冯向阳. 1999. 医巫闾山变质核杂岩构造特征. *地球学报*, 20(4): 385–391
- 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 柳小明. 2006. 辽西东南部中生代花岗岩时代. *岩石学报*, 22(2): 315–325
- 张必龙, 朱光, 姜大志, 陈印, 胡召齐. 2011. 辽西医巫闾山变质核杂岩的形成过程与晚侏罗世伸展事件. *地质论评*, 57(6): 779–798