

# 龙泉关韧性剪切带同变形花岗岩的构造特征 及其独居石定年

赵 兰, 张进江, 刘树文

(北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

**摘 要:** 龙泉关韧性剪切带强变形部位发育一系列平行剪切带走向展布的花岗岩脉体, 构造变形特征表明它们可能是同变形花岗岩, 是剪切作用下围岩部分熔融的产物。通过独居石电子探针定年, 测得龙泉关韧性剪切带的年龄分别为: 主变形幕发生于 1877~1846 Ma, 第2个变形幕发生于 1812~1782 Ma, 晚期 1725 Ma 左右又经历了流体活动。龙泉关韧性剪切带的发生、发展与华北克拉通中部带古元古代晚期的变质事件同期, 是东、西陆块碰撞的一个主要剪切带。

**关键词:** 龙泉关韧性剪切带; 五台山; 同变形花岗岩; 独居石探针测年

中图分类号: P542; P588.12<sup>+1</sup>; P597<sup>+3</sup> 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2006)03-0210-09

## Syn-deformational granites of the Longquanguan ductile shear zone and their monazite electronic microprobe dating

ZHAO Lan, ZHANG Jin-jiang and Liu Shu-wen

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871, China)

**Abstract:** A series of prolonged granitic intrusions occur along the foliation of the Longquanguan ductile shear zone. Petrological and structural characteristics show that they are possibly syn-deformational granites resulting from partial melting of the country rock caused by shearing. The electronic microprobe dating of monazites from these granites shows that the major deformation episode took place at 1877~1846 Ma, the second deformation episode occurred at 1812~1782 Ma, and the fluid activities happened in the late stage at about 1725 Ma. The major deformation of the Longquanguan ductile shear zone occurred synchronously with the tectonic events in the central zone of the North China craton in the Late Paleoproterozoic, and this shear zone seems to have been one of the main shear zones formed by the collision of eastern and western blocks.

**Key Words:** Longquanguan ductile shear zone; Wutai Mountains; syn-deformational granite; monazite electronic microprobe dating

根据花岗岩体侵位与构造运动的时间关系, 可将其分为构造前、同构造和构造后花岗岩体。大型剪切带常伴随同构造期花岗质岩体的重熔或侵位, 剪切热、流体的加入以及地壳的增厚导致地壳物质原地部分熔融, 形成同变形构造花岗岩( Brun and

Cobbold, 1980)。前人研究表明这些花岗质岩浆作用与韧性剪切带活动有着密切的成因关系, 并具有时间上的一致性, 所以可利用同变形构造花岗岩确定构造事件的变形时间( Ingram and Hutton, 1994; 张进江, 1999)。

收稿日期: 2006-03-01; 修订日期: 2006-03-23

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(40420120135)

作者简介: 赵 兰(1980-), 女, 硕士生, 构造地质学专业; 通讯作者: 张进江, 电话: 010-62754368, E-mail: zhjj@pku.edu.cn。

独居石电子探针定年方法是近 10 余年来发展起来的地质定年新方法,是在岩石薄片下对独居石单矿物原位定年的新技术(Suzuki and Adachi, 1991, 1998; Montel *et al.*, 1996; Rhede *et al.*, 1996; Cocherie *et al.*, 1998; 刘树文等, 2004; 党青宁等, 2004)。它的测试精度通常低于 SHRIMP 锆石 U-Pb 和 Pb-Pb 年龄测试精度,但由于采用了薄片下原位定年技术,使其所测年龄的地质意义非常明确。其样品制备类似于电子探针矿物常规成分分析,测试速度快,可以在十几分钟内完成一个点年龄的测定,空间分辨率高。本文在大量野外工作的基础上讨论了龙泉关剪切带同剪切花岗岩的构造岩石学特征,采用独居石电子探针定年技术对其进行定年,目的在于确定剪切带的变形年龄。

## 1 区域地质概况

龙泉关韧性剪切带位于山西省和河北省交界的太行山地区,为分割东部太古宇阜平杂岩和西部太古宇五台杂岩的重要地质界限。在本文填图范围内,该剪切带北起神堂堡,经过长城岭、湾子、门限石,南至耿镇、屋腔一带,长约 50 km,宽约 2~14 km,呈北北东向带状展布(图 1)。该剪切带内主体岩性为一套低角闪岩相的眼球状片麻岩、浅粒岩和少量的斜长角闪岩,前人称之为龙泉关群<sup>①</sup>。近年来研究表明这些岩石的原岩主体为变质的花岗质岩石,其中残留了部分表壳岩(刘树文, 1995; 刘树文等, 1997)。这些正副变质岩石经历了强烈的构造变形,产生了不同程度的糜棱岩化作用,形成了眼球状或条带状糜棱岩化片麻岩,应变集中部分形成了典型的糜棱岩(李江海等, 1991; 许荣华等, 1995; 唐先梅等, 1997)。

龙泉关韧性剪切带糜棱面理倾向 NWW-W, 总体优势倾向角为 10~20°。剪切带下盘为太古宇阜平杂岩,上盘主体为太古宇五台杂岩(白瑾等, 1986; 田永清, 1991; 伍家善等, 1989)和以角度不整合覆盖于五台群杂岩之上的古元古代溇沱群(Cawood *et al.*, 1998)。五台杂岩主要由角闪岩相到绿片岩相变质的各类片岩、角闪片岩、斜长角闪岩和花岗质片麻岩组成,局部含有条带状磁铁石英岩。溇沱群主要由浅变质的长英质碎屑岩、碳酸盐岩组成,夹有少量的

变质火山岩。阜平杂岩下部为含有铁镁质麻粒岩包体的 TTG 片麻岩,即阜平片麻岩,上部由角闪岩相变质的湾子变质层状岩系组成(刘树文, 1995; 刘树文等, 1997; Liu *et al.*, 2002),之间为城南庄变形带(唐先梅等, 1997)。下部阜平片麻岩经历了强烈的变形作用和深熔混合岩化作用,上部的湾子变质层状岩系主要由一套经受变质作用和局部混合岩化作用的各种片麻岩及少量浅粒岩、大理岩、斜长角闪岩和磁铁角闪石英岩等组成,以副变质岩为主。

## 2 龙泉关韧性剪切带的构造变形特征

龙泉关韧性剪切带位于五台杂岩和阜平杂岩的接触部位,但被卷入和改造的岩层主要来自于阜平杂岩。在龙泉关-长城岭剖面上(图 2a),剪切带与上覆五台杂岩的接触关系明显,这里的五台杂岩为低级变质的砂岩,底部轻度变形,而龙泉关剪切带则由糜棱状片麻岩组成,两个单元的对比强烈,边界分明,有层状的基性岩侵入。相反,龙泉关剪切带的下边界与阜平杂岩的界线很不明显,并且表现为由阜平杂岩的条带状面理化的片麻岩过渡到剪切带的眼球状糜棱状片麻岩。

糜棱状花岗岩是该剪切带的一个主要组分。本文自口泉至耿镇,共对剪切带进行了 3 条剖面的构造要素测量和采样分析(图 1、2),可知龙泉关韧性剪切带由糜棱状岩石组成,岩石组合主要由一套低角闪岩相眼球状片麻岩、变粒岩、斜长角闪岩和花岗岩及混和岩组成。剪切带内,片麻岩-混合岩-糜棱状花岗岩过渡出现,大量发育的糜棱状花岗岩平行于剪切面理展布。绝大多数花岗岩都经历了韧性剪切而形成糜棱状岩石,但有些局部区域还保留了原生的岩浆流动构造(图 3a),流动构造反映的运动学性质与其周围花岗岩内部韧性变形部分及围岩(片麻岩)中韧性剪切反映的运动性质相同。在有些露头上,花岗岩脉切穿了糜棱状片麻岩的面理,但脉体本身也经历了剪切流动而形成小褶皱(图 3b)。更为重要的是,有的露头上,糜棱状片麻岩形成了糜棱状花岗岩的包体(图 3d),片麻岩内的面理与花岗岩中的面理平行,且面理可从片麻岩追踪到花岗岩中,然而在同一露头上,糜棱状花岗岩却形成了片麻岩中的大型碎斑系而经历片麻岩中的剪切变形(图 3c)。这

① 山西省地质局区域地质测量队, 1967. 1:20 万平型关幅地质图说明书(J-49-XII)。

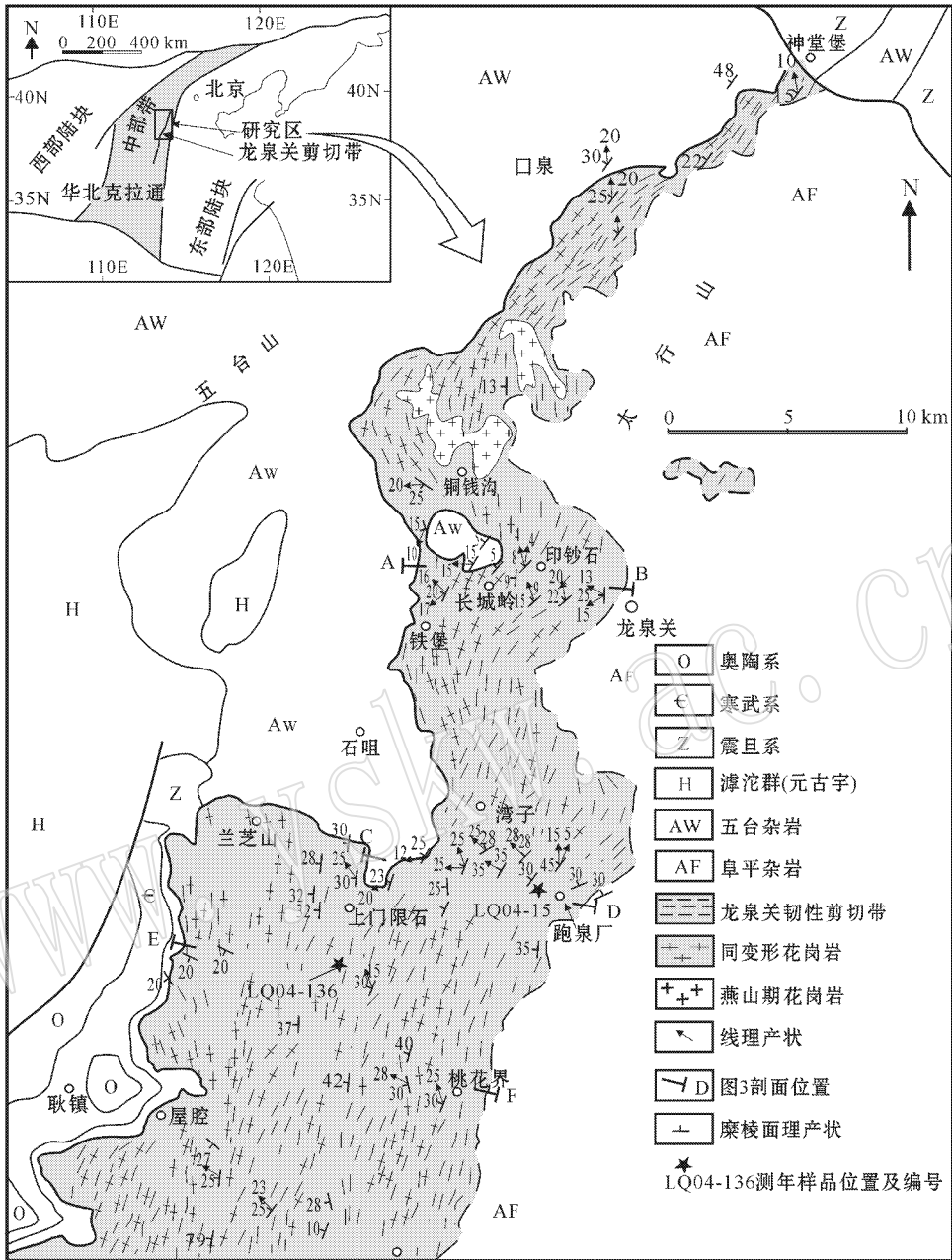


图 1 龙泉关韧性剪切带地质图

Fig. 1 Geological map of the Longquanguan ductile shear zone

些都说明了剪切带内的这些花岗岩具有同变形特征。

剖面分析显示,剪切带边缘变形较弱,向中心部位变形逐渐增强。由边界到中心,岩石依次由片麻岩、糜棱状眼球糜棱岩及条带状糜棱岩、糜棱状花岗岩及糜棱岩组成(图 2)。尽管变形程度不同,所有岩石中均发育良好的糜棱状结构,如面理、线理和不对称构造等。剪切面理透入性发育于整个剪切带,由云母、角闪石及花岗岩流动构造中的长石定向排列

及石英、长石等矿物的定向拉伸和压扁形成。所有面理倾向 NWW-W,总体走向为 NNE(这限定了龙泉关剪切带的走向)(图 1)。面理的倾角很缓,0°~40°,绝大多数缓于 20°。

龙泉关剪切带内共发育 3 期线理(图 4),最早一组为矿物拉伸线理,由矿物的定向排列(如云母和角闪石)及矿物的定向拉伸形成(如石英和长石)。该期线理为透入性线理,发育于各岩石单元内部,形成龙泉关剪切带的主导线理,统计倾伏向为 N60°W 左

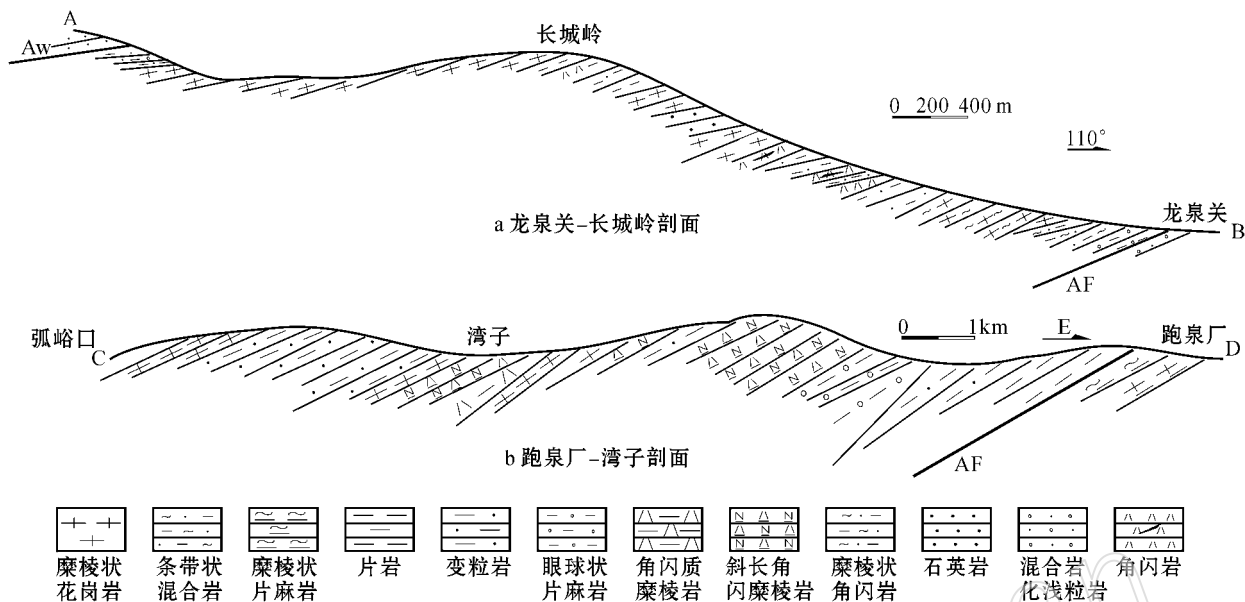


图 2 龙泉关韧性剪切带实测剖面图

Fig. 2 Geological section of the Longquanguan ductile shear zone

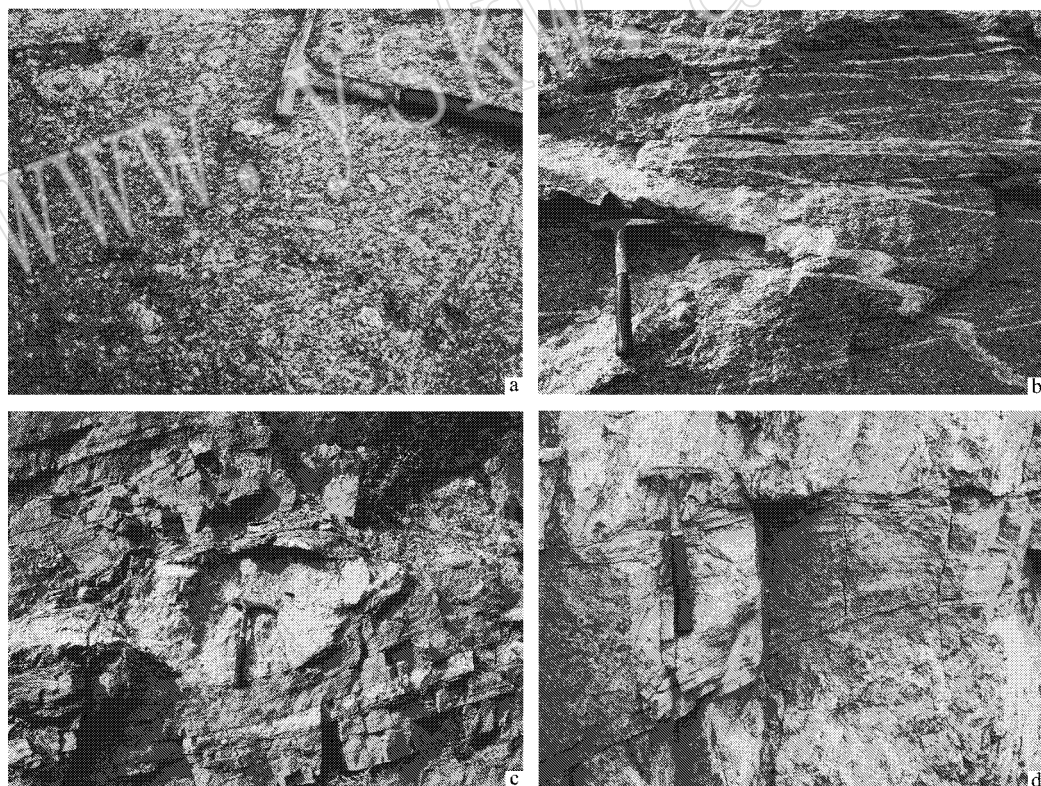


图 3 龙泉关韧性剪切带野外剪切标志照片

Fig. 3 Field photos of shear deformation marks from the Longquanguan ductile shear zone

右,可能代表剪切带主期变形。第 2、3 期线理为非透入性线理,仅发育于劈理面,表现为热擦痕,由机械

刻痕和水热矿物纤维形成。其中第 2 期向北倾伏,第 3 期向 SWW 倾伏,两者可能代表后期的垮塌。

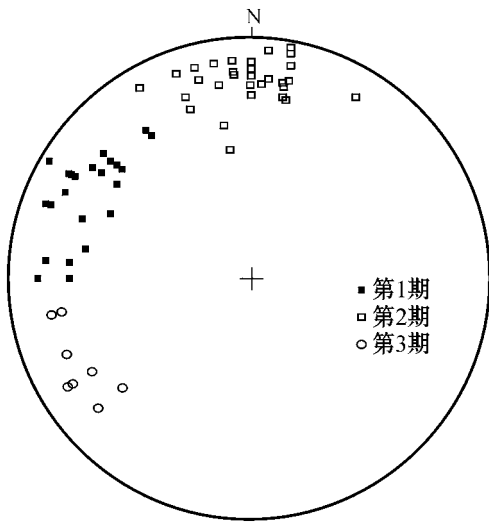


图 4 龙泉关韧性剪切带线理投影图(下半球)

Fig. 4 Projection of lineations in the Longquanguan ductile shear zone (lower hemisphere)

在糜棱状岩石发育大量的不对称剪切应变标志,最常见的是片麻岩中不对称眼球构造和花岗岩中的不对称碎斑系,它们均由钾长石斑晶和重结晶尾部组成。另一种常见的不对称构造是糜棱状花岗

岩中的 S-C 面理,在碎斑系内 S 面理由长石斑晶的长轴形成,重结晶尾部形成 C 面理。其他运动学标志还包括由面理或脉体形成从不对称褶皱、由长英质和基性岩脉形成的不对称布丁构造、巨大钾长石斑晶的多米诺构造及稍晚期的雁列脉等。上述所有不对称剪切应变标志透入性发育于岩石中,并与第一期线理相关,即它们是由龙泉关剪切带主期变形形成的。剪切标志的不对称性表明,龙泉关剪切带主期剪切运动为上盘自 NWW 向 SEE 运动。综合上述构造及岩石学特征可知,龙泉关剪切带内大量发育的糜棱状花岗岩为同剪切变形花岗岩。

### 3 同变形花岗岩的独居石测年

#### 3.1 测定结果和年龄计算

独居石 Th-U-Pb 电子探针分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室电子探针室进行,使用仪器为 JXA8100 电子探针仪, X 射线束斑为  $1\ \mu\text{m}$ , 加速电压 15 kV, 电流强度  $1 \times 10^{-7}\ \text{A}$ , 记数时间每个分析点为 13 min。详细的分析方法、步骤、工作条件和计算方法见刘树文等(2004)和党青宁等(2004), 分析结果见表 1。

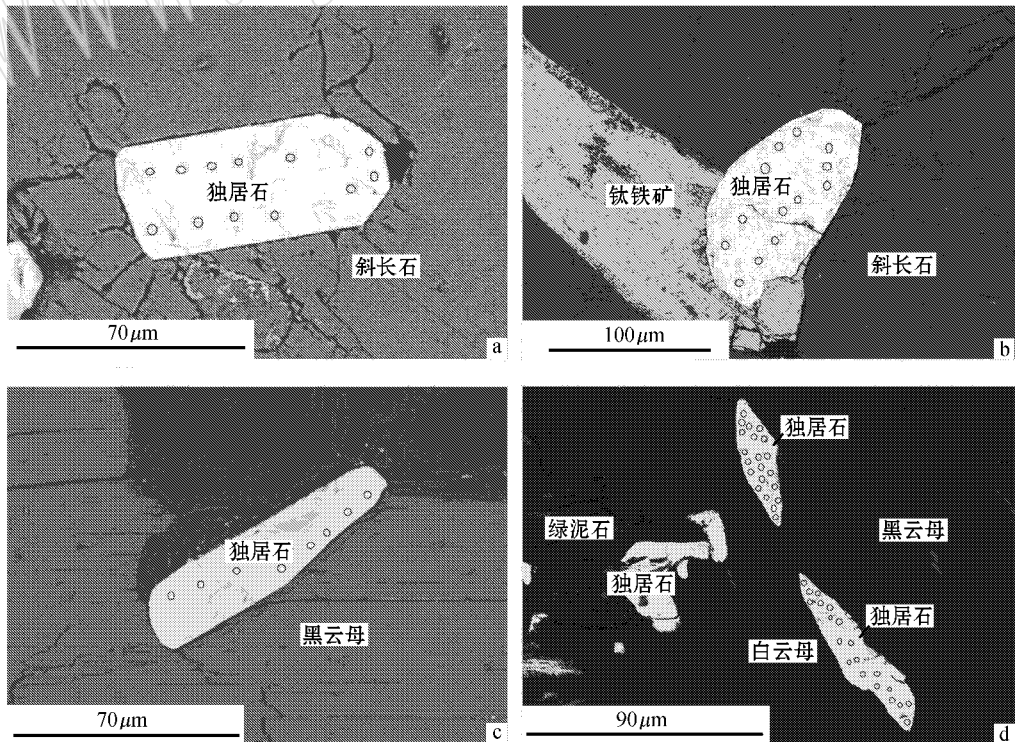


图 5 独居石的背散射图像及其电子探针测年分析点位

Fig. 5 BSE images and electron probe analysis points of monazites

表 1 龙泉关韧性剪切带糜棱状花岗岩中独居石测年结果

Table 1 Analytical results of monazites from the mylonitic granite rocks in the Longquanguan ductile shear zone

样品编号	Th	Err	U	Err	Pb	Err	Age/Ma	Age err/Ma
	$w_B/\%$							
LQ04-15-1.1	2.50	0.043	0.17	0.001	0.27	0.001	2 029	20
LQ04-15-1.2	2.89	0.050	0.13	0.001	0.27	0.001	1 834	18
LQ04-15-1.3	1.72	0.030	0.09	0.001	0.17	0.001	1 938	19
LQ04-15-1.4	2.11	0.036	0.11	0.001	0.19	0.001	1 741	17
LQ04-15-1.5	3.20	0.055	0.12	0.001	0.29	0.001	1 819	18
LQ04-15-1.6	2.72	0.047	0.22	0.001	0.28	0.001	1 882	19
LQ04-15-1.7	2.42	0.042	0.17	0.001	0.24	0.001	1 843	18
LQ04-15-1.8	2.69	0.046	0.16	0.001	0.27	0.001	1 905	19
LQ04-15-1.9	2.60	0.045	0.17	0.001	0.25	0.001	1 811	18
LQ04-15-1.10	2.30	0.040	0.13	0.001	0.22	0.001	1 849	19
LQ04-15-1.11	1.67	0.029	0.10	0.001	0.16	0.001	1 774	18
LQ04-15-1.12	3.80	0.065	0.16	0.001	0.34	0.001	1 765	18
LQ04-15-2.1	2.55	0.044	0.21	0.001	0.27	0.001	1 864	19
LQ04-15-2.2	2.80	0.048	0.24	0.001	0.28	0.001	1 772	18
LQ04-15-2.3	2.55	0.044	0.14	0.001	0.25	0.001	1 861	19
LQ04-15-2.4	2.65	0.046	0.18	0.001	0.26	0.001	1 809	18
LQ04-15-2.5	2.63	0.045	0.13	0.001	0.24	0.001	1 803	18
LQ04-15-2.6	2.19	0.038	0.10	0.001	0.21	0.001	1 860	19
LQ04-15-2.7	1.98	0.034	0.08	0.001	0.17	0.001	1 681	17
LQ04-15-2.8	2.03	0.035	0.11	0.001	0.18	0.001	1 682	17
LQ04-15-2.9	2.24	0.039	0.10	0.001	0.21	0.001	1 861	19
LQ04-15-2.10	2.45	0.042	0.17	0.001	0.24	0.001	1 840	18
LQ04-15-2.11	2.05	0.035	0.10	0.001	0.18	0.001	1 739	17
LQ04-15-2.12	2.11	0.036	0.13	0.001	0.19	0.001	1 698	17
LQ04-15-2.13	2.37	0.041	0.17	0.001	0.22	0.001	1 735	17
LQ04-15-3.1	2.22	0.038	0.15	0.001	0.21	0.001	1 777	18
LQ04-15-3.2	2.26	0.039	0.15	0.001	0.21	0.001	1 781	18
LQ04-15-3.3	2.54	0.044	0.26	0.001	0.27	0.001	1 842	18
LQ04-15-3.4	2.62	0.045	0.27	0.001	0.27	0.001	1 780	18
LQ04-15-3.5	2.52	0.043	0.24	0.001	0.27	0.001	1 826	18
LQ04-15-3.6	3.32	0.057	0.14	0.001	0.27	0.001	1 652	17
LQ04-15-3.7	2.64	0.045	0.26	0.001	0.26	0.001	1 711	17
LQ04-15-3.8	2.52	0.043	0.24	0.001	0.26	0.001	1 783	18
LQ04-15-3.9	2.57	0.044	0.27	0.001	0.26	0.001	1 711	17
LQ04-15-3.10	2.56	0.044	0.28	0.001	0.26	0.001	1 721	17
LQ04-136-1.1	1.87	0.032	0.07	0.001	0.19	0.001	2 059	21
LQ04-136-1.2	2.32	0.040	0.07	0.001	0.23	0.001	2 007	20
LQ04-136-1.3	1.51	0.026	0.10	0.001	0.15	0.001	1 864	19
LQ04-136-1.4	1.51	0.026	0.09	0.001	0.14	0.001	1 787	18
LQ04-136-1.5	1.62	0.028	0.09	0.001	0.16	0.001	1 899	19
LQ04-136-1.6	1.89	0.033	0.08	0.001	0.19	0.001	1 950	20
LQ04-136-1.7	1.71	0.029	0.10	0.001	0.18	0.001	1 970	20
LQ04-136-1A.1	2.78	0.048	0.05	0.001	0.24	0.001	1 884	30
LQ04-136-1A.2	3.12	0.054	0.04	0.001	0.25	0.001	1 727	28
LQ04-136-1A.3	2.88	0.050	0.05	0.001	0.25	0.001	1 858	29
LQ04-136-1A.4	2.90	0.050	0.04	0.001	0.27	0.001	1 994	32
LQ04-136-1A.5	2.70	0.046	0.03	0.001	0.23	0.001	1 881	30
LQ04-136-1B.1	2.91	0.050	0.05	0.001	0.26	0.001	1 906	30
LQ04-136-1B.2	2.89	0.050	0.05	0.001	0.25	0.001	1 864	30
LQ04-136-1B.3	3.01	0.052	0.04	0.001	0.26	0.001	1 868	30
LQ04-136-1B.4	2.98	0.051	0.04	0.001	0.27	0.001	1 970	31
LQ04-136-1B.5	2.88	0.050	0.04	0.001	0.25	0.001	1 865	30
LQ04-136-1B.6	2.96	0.051	0.04	0.001	0.26	0.001	1 877	30
LQ04-136-1B.7	2.71	0.047	0.03	0.001	0.23	0.001	1 816	30

续表 1  
continued Fig. 1

样品编号	Th	Err	U	Err	Pb	Err	Age/Ma	Age err/Ma
	$w_B/\%$							
LQ04-136-1B.8	2.65	0.046	0.04	0.001	0.23	0.001	1 894	31
LQ04-136-1B.9	2.44	0.042	0.04	0.001	0.25	0.001	2 134	33
LQ04-136-1B.10	2.53	0.044	0.03	0.001	0.19	0.001	1 651	27
LQ04-136-2.1	3.60	0.062	0.13	0.001	0.30	0.001	1 684	17
LQ04-136-2.2	2.21	0.038	0.10	0.001	0.20	0.001	1 805	18
LQ04-136-2.3	2.49	0.043	0.12	0.001	0.21	0.001	1 652	17
LQ04-136-2.4	3.42	0.059	0.12	0.001	0.29	0.001	1 721	17
LQ04-136-2.5	3.09	0.053	0.10	0.001	0.27	0.001	1 826	18
LQ04-136-2.6	2.98	0.051	0.10	0.001	0.27	0.001	1 814	18
LQ04-136-2.7	2.93	0.050	0.08	0.001	0.26	0.001	1 875	19
LQ04-136-2.8	4.76	0.082	0.17	0.001	0.41	0.001	1 734	17
LQ04-136-2A.1	3.56	0.061	0.05	0.001	0.30	0.001	1 820	29
LQ04-136-2A.2	3.80	0.065	0.05	0.001	0.33	0.001	1 905	30
LQ04-136-2A.3	5.84	0.100	0.08	0.001	0.53	0.001	1 954	30
LQ04-136-2A.4	5.71	0.098	0.06	0.001	0.47	0.001	1 800	28
LQ04-136-2A.5	5.28	0.091	0.06	0.001	0.46	0.001	1 907	30
LQ04-136-2B.1	3.66	0.063	0.05	0.001	0.33	0.001	1 952	31
LQ04-136-2B.2	4.07	0.070	0.05	0.001	0.34	0.001	1 800	28
LQ04-136-2B.3	4.86	0.084	0.06	0.001	0.41	0.001	1 821	29
LQ04-136-2B.4	6.50	0.112	0.08	0.001	0.54	0.001	1 817	29
LQ04-136-2B.5	4.15	0.071	0.05	0.001	0.32	0.001	1 700	27
LQ04-136-2B.6	4.96	0.085	0.06	0.001	0.41	0.001	1 788	28
LQ04-136-2B.7	3.64	0.063	0.05	0.001	0.32	0.001	1 895	30
LQ04-136-2B.8	4.80	0.083	0.05	0.001	0.39	0.001	1 797	29

本次研究共对两个样品进行年代学分析,一个是采自跑泉厂-湾子剖面的 LQ04-15 号样品(图 1、图 2b),另一个是采自桃花界-门限石剖面的 LQ04-136 号样品(图 1),均为糜棱状花岗岩,主要矿物组合为石英+钾长石+斜长石+黑云母。样品中的独居石为自形晶,且主要生长于同样是自形晶的长石(图 5a)及黑云母(图 5c)矿物颗粒之间(图 5d),多数粒间独居石生长于主矿物晶体的三连点部位(图 5b),少数沿黑云母的长边界分布(图 5c);个别独居石则生长于斜长石的晶体内部,但晶体自形程度很高(图 5a)。独居石的自形程度及生长位置说明龙泉关剪切带中糜棱状花岗岩中的独居石为岩浆成因矿物。本次共对样品中的 5 颗独居石进行了年龄测定,对每颗独居石做成分分析剖面,共分析了 50 个测点。其中对 LQ04-15 的 3 颗独居石进行了 35 个点的分析,对 LQ04-136 的 2 个颗粒进行了 43 个点的分析(表 1)。

用 Geisler 等(2000)的方法和软件计算了每个分析测试点的表观年龄(表 1),在此基础上,使用 Iso-plot/Ex 同位素年龄计算通用软件计算得到龙泉关剪切带花岗岩的独居石年龄概率图(图 6)。龙泉关

LQ04-15 样品的峰年龄分别为  $1\ 846 \pm 0.8\ \text{Ma}$ 、 $1\ 782 \pm 0.8\ \text{Ma}$ 、 $1\ 725 \pm 0.5\ \text{Ma}$ ,样品 LQ04-136 峰年龄分别为  $1\ 960 \pm 5.9\ \text{Ma}$ 、 $1\ 877 \pm 11\ \text{Ma}$ 、 $1\ 812 \pm 11\ \text{Ma}$  和  $1\ 727 \pm 5.2\ \text{Ma}$ 。

LQ04-15 的 3 个峰年龄中, $1\ 846 \pm 0.8\ \text{Ma}$  为主峰,代表了同剪切花岗岩形成年龄,是剪切带活动的主变形幕,对应中部带的主要变质事件(wilde, 1998; Zhao *et al.*, 2002; Köner *et al.*, 2005); $1\ 782 \pm 0.8\ \text{Ma}$  代表了剪切带活动的第 2 个变形幕,对应均衡隆升期; $1\ 725 \pm 0.5\ \text{Ma}$  对应晚期流体活动。

由图 6 可知,LQ04-136 为先熔出来的样品,记录的事件较多。它多个峰年龄,其中  $1\ 960 \pm 5.9\ \text{Ma}$  是继承年龄,对应区域性的南营片麻岩花岗岩浆活动(Liu *et al.*, 2005); $1\ 877 \pm 11\ \text{Ma}$  对应 LQ04-15 样品的  $1\ 846 \pm 0.8\ \text{Ma}$ ,代表剪切带活动的主变形幕; $1\ 812 \pm 11\ \text{Ma}$  对应构造隆升, $1\ 727 \pm 5.2\ \text{Ma}$  对应 LQ04-15 样品的  $1\ 725 \pm 0.5\ \text{Ma}$ ,代表晚期流体活动。

本次独居石定年结果表明,各峰期分别与区域变质事件已有的定年结果相一致,因此,该定年结果是可信的。前述已表明独居石是花岗岩结晶时形成

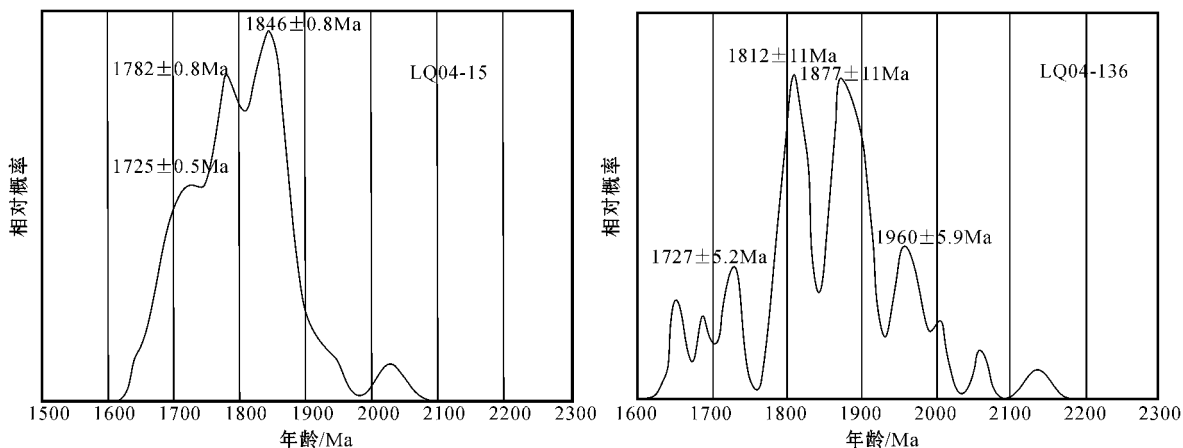


图6 龙泉关韧性剪切带同变形花岗岩独居石定年结果

Fig. 6 Results of monazite dating for syn-deformational granites in the Longquanguan ductile shear zone

的,其年龄是同变形花岗岩的形成年龄,代表剪切带的变形时代。龙泉关花岗岩岩石中1877~1846 Ma的独居石年龄可能是龙泉关韧性剪切带的变形的主要年龄,该剪切带形成于古元古代,后期又经历了多次活动。

值得注意的是,越来越多的研究利用不同的测试方法获得了1850 Ma左右的年龄数据,说明1850 Ma左右的地质事件是华北克拉通、特别是中部带早期演化所经历的最重要地质事件之一,并被解释为东、西部地块碰撞引起的主期造山变形及变质事件(Cawood *et al.*, 1998; wilde *et al.*, 1998, 2002; Zhao *et al.*, 2002, 2005; 刘树文等, 2004; Kröner, *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2005)。

## 4 结论

(1) 从岩石学和野外构造特点上判断出剪切带中大量发育的糜棱状花岗岩是剪切变形时围岩部分熔融的同剪切变形花岗岩。

(2) 由同变形花岗岩的独居石年龄可知剪切带形成于古元古代晚期,主变形幕形成于1877~1846 Ma,第2个变形幕发生于1812~1782 Ma,晚期1725 Ma左右又经历了流体活动。

(3) 通过定年结果表明,龙泉关韧性剪切带与元古代的变质事件同期,是东西陆块碰撞的一个主要剪切带。

## References

- Bai Jin. 1986. Wutai Mountain Early Precambrian Geology [M]. Tianjin Science and Technology Publishing House, 1~275 (in Chinese).
- Brun J P and Cobbold P R. 1980. Strain heating and thermal softening in continental shear zones: a review [J]. *Journal of Structural Geology*, 2(1/2):149~158.
- Cawood P A, Wilde S A, Wang K Y, *et al.* 1998. Integrated geochronology and field constraints on subdivision of the Precambrian in China: Data from the Wutaihar [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43 (supplement):17
- Cocherie A, Legendre O and Peucat J J. 1998. Geochronology of poly-genetic monazites constrained by in situ electron microprobe Th-U total lead determination: Implications for lead behaviour in monazite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62:2475~2497.
- Dang Qinglong, Liu Shuwen, Shu Guiming, *et al.* 2004. Electron microprobe dating of monazite and its application to metamorphism in eastern Tianshan, Xinjiang [J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(4):578~585 (in Chinese with English abstract)
- Geisler T and Schlicher H. 2000. Improved U-Th-total Pb dating of zircons by electron microprobe using a simple new background modeling procedure and Ca as a chemical criterion of fluid-induced U-Th-Pb discordance in zircon [J]. *Chemical Geology*, 163:269~285
- Ingram G M and Hutton D H W. 1994. The Great Tonalite Sill: Emplacement into a contractional shear zone and implications for Late Cretaceous to early Eocene tectonics in southeastern Alaska [J]. *Bulletin of the Geological Society of American*, 106:715~720.
- Kato T, Suzuki K and Adachi M. 1999. Computer program for the CHEME age calculator [J]. *Earth Planet. Sci. Nagoya Univ.*, 46:49~56.



- Kröner A, Wilde S A, Li J H, *et al.* 2005. Age and evolution of a late Archean to early Palaeozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 :577~595.
- Li Jianghai and Qian Xianglin. 1991. A study on Longquanguan shear zone in northern part of Taihang Mountain[J]. *Shanxi Geology*, 6 (1):17~29 (in Chinese).
- Liu Shuwen. 1995. Study on fluid inclusions from high grade metamorphic rocks in east Hebei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (4):375~385 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen and Liang Haihua. 1997. Metamorphism of Al-rich gneisses in Taihang Mountain Archean metamorphic complex[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(3):303~312 (in Chinese with English abstract).
- Liu S W, Pan Y M, Li J H, *et al.* 2002. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 117 :41~56.
- Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, *et al.* 2005. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying granitic gneisses in the Fuping complex: implications for the tectonic evolution of the Central zone, North China Craton[J]. *Journal of Asia Earth Sciences*, 24 :643~658.
- Liu Shuwen, Shu Guiming, Pan Yuanming, *et al.* 2004. Electron microprobe dating of monazite and metamorphic age of Wutai group, Wutai Mountain[J]. *Geological Journal of China University*, 10(3):357~363 (in Chinese).
- Montel J M, Foret S and Veschambre M. 1996. Electron microprobe dating of monazite[J]. *Chemical Geology*, 131 :37~53.
- Rhede D, Wendt I and Forster H J. 1996. A three-dimensional method for calculating independent chemical U/Pb- and Th/Pb-ages of accessory mineral[J]. *Chemical Geology*, 130 :247~253.
- Suzuki K and Adachi M. 1991. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosaxa paragneiss in the South Kitakani terrane, Northeast Japan[J]. *Geochem J.*, 25 :357~376.
- Suzuki K and Adachi M. 1998. Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids[J]. *Metamorphic Geol.*, 16 :23~37.
- Tang Xianmei and Liu Shuwen. 1997. An initial research on the extension deformation belt in the Archean metamorphic rocks in the northern Taihang Mountain[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 33(4):447~455 (in Chinese).
- Tian Yongqing. 1991. Wutai-Hengshan Mountain Greenstone Belt Geology and Gold Mineralization[M]. Shanxi Science and Technology Publishing House, 1~227 (in Chinese).
- Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y, *et al.* 1998. SHRIMP U-Pb zircon dating of granites and gneisses in the Taihangshan-Wutaishan area: implications for the timing of crustal growth in the North China craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43 :144~145.
- Wilde S A, Zhao G C and Sun M. 2002. Development of the North China Craton during the Late Archean and its amalgamation along a major 1.8 Ga collision zone; including speculations on its position within a global Paleoproterozoic supercontinent[J]. *Condwana Research*, 5 :85~94.
- Wu Jiashan, Geng Yuansheng, Xu Huifen, *et al.* 1989. Fuping group metamorphic geology[J]. *Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, (19)3~10 (in Chinese).
- Xu Ronghua, Zhu Ming, Chen Fukun, *et al.* 1995. A geochronological study of the Longquanguan ductile shear zone[J]. *Quaternary Sciences*, (4)332~341 (in Chinese).
- Zhang Jinjiang. 1999. Indicators for syntectonic granites in large-scale strike-slip zone[J]. *Geological Science and Technology Information*, 18(4)23~26 (in Chinese).
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136 :177~202.
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: Implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton[J]. *Am. J. Sci.*, 302 :191~226.

#### 附中文参考文献

- 白 瑾. 1986. 五台山早前寒武纪地质[M]. 天津:天津科学出版社, 1~275.
- 党青宁, 刘树文, 舒桂明, 等. 2004. 独居石电子探针定年及其在新疆东天山变质作用研究中的应用[J]. *高校地质学报*, 10(4):578~585.
- 李江海, 钱祥麟. 1991. 太行山北段龙泉关韧性剪切带研究[J]. *山西地质*, (1):17~29.
- 刘树文. 1995. 冀东高级变质岩石的流体包裹体研究[J]. *岩石学报*, 11(4):375~385.
- 刘树文, 梁海华. 1997. 太行山太古宙变质杂岩中富铝片麻岩的变质作用[J]. *岩石学报*, 13(3):303~312.
- 刘树文, 舒桂明, 潘元明, 等. 2004. 电子探针独居石定年法及五台群的变质时代[J]. *高校地质学报*, 10(3):357~363.
- 唐先梅, 刘树文. 1997. 太行山北段晚太古宙变质杂岩伸展变形带的初步研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 33(4):447~455.
- 田永清. 1991. 五台山-恒山绿岩带地质及金的成矿作用[M]. 山西科学出版社, 1~227.
- 伍家善, 耿元生, 徐惠芬, 等. 1989. 阜平群变质地质[J]. *中国地质科学院研究所所刊* (19)3~10.
- 许荣华, 朱 铭, 陈福坤, 等. 1995. 龙泉关韧性剪切带的年代学研究[J]. *第四纪研究*, (4)332~341.
- 张进江. 1999. 大型走滑带内同构造花岗岩的判别标志[J]. *地质科技情报*, 18(4):23~26.