

辽南金州拆离带糜棱状花岗岩脉体变形特征 及锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

——韧性拆离时限的新证据

欧阳志侠, 王 涛, 李建波, 郭 磊, 曾令森

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘 要: 辽南金州拆离断层带中发育糜棱状花岗岩脉。野外观察与显微构造分析显示该脉体为同构造变形脉体, 与围岩太古宙片麻岩一起经历了伸展韧性剪切变形。长石 Fry 法的应变测量结果显示样品的付林参数 $K=0.83$, 罗德参数 $\nu=0.09$, 应变强度 $E_s=0.71$, 表明该岩石应变以平面应变为主, 且有限应变较强, 运动学涡度为 $W_k=0.89$, 表明剪切作用类型以简单剪切为主。对该花岗岩脉进行锆石 SHRIMP U-Pb 年代学测定, 10 颗岩浆锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $129 \pm 2 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.6$), 代表岩脉侵位年龄。结合该区研究的最新成果, 表明金州拆离断层至少在 129 Ma 已经开始韧性变形, 辽南地区构造体制在此时已经从缩短转折到伸展。

关键词: 糜棱状花岗岩脉体, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄, 应变, 金州拆离断层, 辽南

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)04-0403-11

Deformation characteristics and zircon SHRIMP U-Pb age of the mylonitized granite vein in Jinzhou detachment fault of southern Liaoning: new evidence for constraint on the ductile detachment time

OUYANG Zhi-xia, WANG Tao, LI Jian-bo, GUO Lei and ZENG Ling-sen

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Extensive crustal extension existent in northeast Asian continent since Late Mesozoic has resulted in the formation of one of the world's largest extensional provinces. Metamorphic core complexes (MCCs) from Lake Baikal to the southern margin of North China constitute a typical extensional phenomenon in this province. The duration and mechanism of such large-scale crustal extension, especially the mechanism of the extension as to whether the stretching took place simultaneously in this region or it was gradually expanded, deserve further research. Obviously the precise chronological limit of the beginning of each metamorphic core complex is an effective means to solve this problem. Syn-tectonic mylonitized granite (vein) is an ideal symbol body for studying the kinematics, dynamics and chronology of the metamorphic core complexes, and is also an important object for determining the structural features and deformation time. Southern Liaoning was a rather intense and typical lithospheric thinning and destruction area in North China Craton during Late Mesozoic, with the formation of the Liaonan metamorphic core complex serving as one of the marks. The authors tentatively studied the deformation features and zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the mylonitized granite vein exposed in the Jinzhou

收稿日期: 2009-12-16; 修订日期: 2010-03-25

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(90714006); 中国地质调查局项目(1212010811033, 1212010611803); 国际合作基金资助项目(40711121079, 40911120066)

作者简介: 欧阳志侠(1984-), 男, 在读硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: oyzxsnaik@163.com; 通讯作者: 王 涛, 博士生导师, 从事花岗岩、构造地质研究, E-mail: taowang@cags.ac.cn

detachment fault of the Liaonan MCC, with the purpose of providing new evidence for constraint on the ductile detachment time. The vein intruded into Archean mylonitic biotite plagioclase gneiss along the mylonitic foliation of the wall rock and underwent a strong extensional ductile shear deformation together with the wall rocks. Field observations and micro-structural analysis show that the vein is syn-kinematic. Fry's finite strain measurements of feldspars show that the sample's Flinn K values is 0.83, Lod v values is 0.09, and strain intensity (E_s) is 0.71, indicating that the mylonite is dominated by plane strain. The kinematic vorticity number (W_k) is 0.89, implying that the deformation is dominated by simple shear. SHRIMP U-Pb dating of the magmatic zircon from the mylonitized granite vein yields an age of 129 ± 2 Ma ($n = 10$, MSWD = 1.6), suggesting that the vein was emplaced in Early Cretaceous. Recent researches have shown that the Liaonan MCC resulted from regional and lithosphere thinning in the North China Craton in Late Mesozoic. The formation of the Jinzhou detachment fault and the uplift on its eastern side are the major indicator of the turning point of the tectonic regime from contraction to extension. In combination with the results obtained by the authors, it is suggested that the Jinzhou detachment fault started its ductile shearing at least at 129 ± 2 Ma and the tectonic regime changed from contraction to extension at this time.

Key words: mylonitized granite vein; zircon SHRIMP U-Pb dating; strain; Jinzhou detachment fault; southern Liaoning(Liaonan)

中生代以来,东亚大陆发生了大规模的地壳伸展,从贝加尔湖到华南北缘发育的变质核杂岩是这期地壳伸展作用的典型代表(如郑亚东, 1990; Zheng *et al.*, 1991, 1994, 1996; Davis *et al.*, 1994; 杨中柱等, 1996; 张进江等, 1998; 马寅生, 1999; Darby *et al.*, 2001, 2004; 王新社等, 2002; 王涛等, 2002, 2007a; Wang *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005; 刘俊来等, 2006; Doskaya *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2008)。这种大规模地壳伸展的时限和作用方式,特别是这种伸展在区域上是同时发生的,还是伸展范围逐渐扩大的问题值得深入研究。显然对每个核杂岩开始伸展拆离进行精确的年代学限定是解决这一问题的有效手段(王涛等, 2007a)。

辽南地区是晚中生代华北克拉通破坏与岩石圈减薄较为强烈和典型的地区,辽南变质核杂岩的形成便是标志之一。辽南变质核杂岩具有典型科迪勒拉型变质核杂岩的特征(杨中柱等, 1996; Liu *et al.*, 2005),是辽南地区变质核杂岩的典型代表。前人对该变质核杂岩的形成时代问题的研究(Yin and Nie, 1996; 曾令森等, 1996; 郭春丽等, 2004; Yang *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2007, 2008; 杨进辉等, 2008; 纪沫等, 2009)大都集中于拆离带附近糜棱岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、K-Ar定年和核部花岗岩的锆石 U-Pb定年。由于角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄记录的是 400~450℃ 封闭温度下的同变形冷却年龄,而黑云母等矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄记录的是 300℃ 左右的同

变形冷却年龄,且易受后期热事件的影响(Reddy and Potts, 1999),往往给出偏小的年龄,难以精确代表伸展开始的时间。另外,如果核部花岗岩岩体与拆离断层构造关系不清,核部岩体的锆石 U-Pb 年龄也难以对伸展时限给予严格限定。而同构造糜棱状花岗岩(脉体)是研究核杂岩运动学、动力学和年代学的理想标志体,是确定构造变形时限和变形构造特征的一种重要研究对象。通过不同期次变形岩体特别是侵入拆离带的不变形、弱变形和强变形花岗岩的锆石定年,可以较准确地限定韧性伸展的时限,有助于了解拆离断层的形成时限和活动历史,进而为研究变质核杂岩的演化过程提供依据(王涛等, 2002, 2007b; Wang *et al.*, 2004)。本文试图通过对出露于辽南变质核杂岩拆离断层带中的糜棱岩化花岗岩脉的构造分析和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究,为限定辽南变质核杂岩韧性伸展拆离的时限提供新证据。

1 地质背景

辽南变质核杂岩位于华北克拉通东部辽东半岛南部,郯庐断裂的东侧(图 1)。作为典型的科迪勒拉型变质核杂岩,具有 3 层结构,由 5 部分构成(Liu *et al.*, 2005):具体包括下盘的角闪岩-麻粒岩相太古宙鞍山群(2 457~2 518 Ma,路孝平等, 2004)、角闪岩-绿片岩相古元古代辽河群(1.93~2.17 Ga, LuO

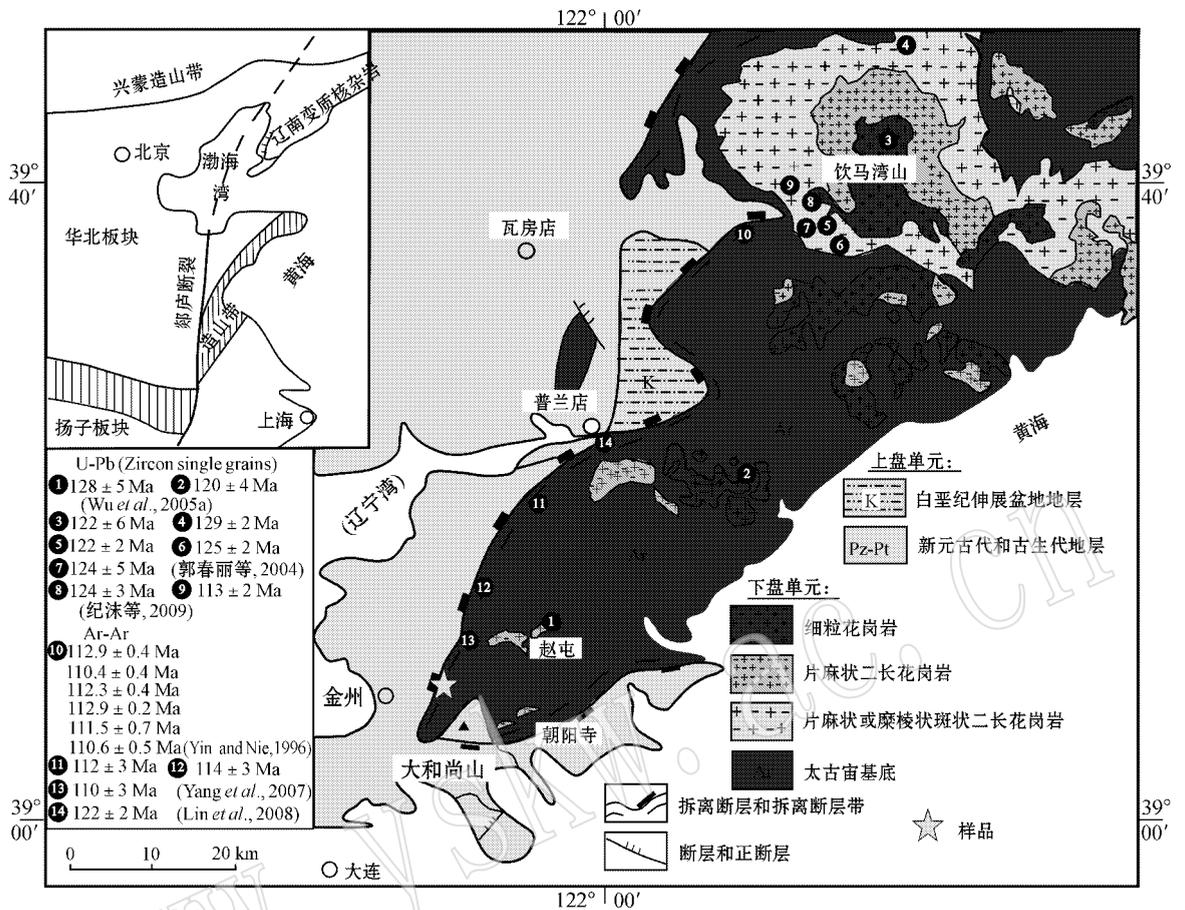


图 1 辽南变质核杂岩地质图 [据 Liu 等(2005)修改]

Fig. 1 Geological sketch map of metamorphic core complexes in southern Liaoning (modified after Liu et al., 2005)

et al., 2004)及侵入其中的晚中生代花岗岩;中部的金州拆离断层和董家沟拆离断层;上盘的新元古代、古生代弱变形沉积岩系和局部地区发育的白垩世上叠伸展盆地(规模较小)(图 1)。

金州拆离断层是辽南变质核杂岩的主拆离带,南起大连湾,沿金州-普兰店-瓦房店-万家岭一线出露,长约 200 km,总体走向 NNE,倾向 W,具典型的波瓦状构造形态(纪沫等, 2008)(图 1)。断层在金州北九里庄完整出露(郑亚东等, 2009),自下而上依次由糜棱岩带、脆韧性剪切带及绿泥石化带、微角砾岩带、脆性断层面和断层泥组成,断层面总体倾向 310°~315°,倾角 28°~35°。主拆离断层带内岩石受到强烈的韧性剪切作用,普遍发育有眼球构造、σ 组构、剪切条带、S-C-C'组构、压力影构造、多米诺构造、石香肠构造、鞘褶皱等,清楚地指示上盘由 SEE→NW 的运动特征。

金州拆离断层和 NEE 向的董家沟拆离断层在金州地区交汇开口向东北呈 V 字形展布(图 1)。董家沟拆离断层西起大和尚山经董家沟向东北方向延伸至黑嘴子,长约 80 km,沿断层仅出露下覆糜棱岩带,糜棱岩中发育面内褶皱,未见微角砾岩及其上的断层泥。

前人从金州拆离断层糜棱岩中获得的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 122~108 Ma (Yin and Nie, 1996; Yang et al., 2007; Lin et al., 2007, 2008; 杨进辉等, 2008), K-Ar 年龄为 118~103 Ma (曾令森等, 1996a), 下盘花岗岩岩体的锆石 U-Pb 年龄为 128~113 Ma (郭春丽等, 2004; Wu et al., 2005a; 纪沫等, 2009), 并由此限定辽南变质核杂岩主要拆离过程发生在 130~120 Ma (纪沫等, 2009), 主拆离带断层的冷却抬升过程主要集中在 114~105 Ma (张允平等, 2004^①)。

① 张允平等, 2004. 华北板块与西伯利亚板块之间重大地质构造问题综合研究报告. 中国地质调查局基础地质综合研究报告.

2 糜棱状花岗岩脉的产状及应变特征

2.1 产状及岩石学特征

金州拆离带中发育一组糜棱状花岗岩脉(图2a),出露于辽宁省大连市金州区响水寺水库公路东南侧,侵入于古老(太古宙)糜棱状黑云斜长片麻岩中(图2b)。围岩太古宙片麻岩强烈变形(图2c),发育糜棱状面理和线理,具眼球状或条带状构造。眼球主要由长石残斑或被拉断的长英质脉体构成,周围被石英条带和暗色矿物集合体环绕显示流动构造,条带由浅色矿物、暗色矿物相间定向排列构成。岩石中普遍发育 δ 组构、鞘褶皱、S-C-C'组构等。

所研究的脉体露头长约15 m,宽约2 m,近东西向延伸。岩脉呈灰白色,条带状、眼球状构造,糜棱结构,长石呈斑状,石英成条带状,原岩应为斑状中-细粒花岗结构(图2d)。显微镜下岩石具变晶糜棱结构,碎斑占约15%,以斜长石为主,斜长石遭受绢云母化,沿解理面局部可见新生白云母,碎斑大小0.4~2.2 mm。基质占约80%,主要由石英、白云母及少量长石组成。副矿有黑云母、锆石、磷灰石、磁铁矿等。岩石内部发育面理和线理,面理产状:280°/12°、线理产状:280°/8°,面理产状平行于脉体边界并与围岩糜棱岩化片麻岩的糜棱面理一致,即脉体沿围岩的糜棱面理灌入(图2b)。岩石中还存在(亚)岩浆流动组构和高温固态流动组构。前者表现为成分条带、暗色析离体的定向(图2d、2f、2g);后者以斜长石的透镜状动态重结晶集合体条带为特征(图2e、2g、2h),是高温(至少>600℃)固态变形的产物(Paterson *et al.*, 1989, 1998)。石英也呈现动态重结晶集合体条带(图2f)。这些特征表明在岩浆结晶过程中或不久便发生了变形,是同侵位变形,这是同构造岩脉的主要鉴别特征(Paterson *et al.*, 1989, 1998; Miller and Paterson, 1994; Schulmann *et al.*, 1996; Schofield and DeLeon's, 1998)。上述特征的出现与岩脉侵入金州拆离断层带时拆离断层正处于主活动期有关。

2.2 应变特征

糜棱状花岗岩中长石多呈透镜状,部分长石被拉成布丁状(图2g)并出现动态重结晶现象,具有典型韧性变形的特点。岩石中S-C-C'组构普遍发育(图2e、2f、2g),C'的发育显示了伸展(减薄型)剪切变形的特点(Zheng *et al.*, 1991; Zheng and Zhang,

1994)。在脉体和围岩手标本光面(图2d)以长石为标志体(镜下为动态重结晶集合体),采用Fry法进行了应变测量,详细数据见表1。样品的付林参数K(脉体0.83,围岩1.35)接近于1,罗德参数 ω (脉体0.09,围岩-0.15)接近于0,应变强度 E_s (脉体0.71,围岩0.60),指示应变类型以平面应变为主,有限应变较强,且脉体的变形程度要强于围岩。采用极摩尔圆法和刚性颗粒网法对脉体和围岩进行了运动学涡度(W_k)计算,结果显示脉体和围岩的平均涡度分别为0.89和0.93,均大于0.75,说明脉体和围岩的剪切作用类型以简单剪切为主。

3 锆石测年方法

测试样品经过人工破碎后,用常规重力和磁选方法分选出锆石。锆石的分选由河北廊坊区调院完成。在双目镜下挑选出用于测年的锆石颗粒,将锆石样品和标准锆石一起放在玻璃板上用环氧树脂固定制成样品靶,将靶上锆石磨至一半,抛光以使锆石内部暴露,接着对锆石进行透射光、反射光照相,然后再进行阴极(CL)发光照相,锆石阴极发光照相在中国地质科学院北京离子探针中心完成。样品测试过程中尽量选择生长环带明显、无包裹体、无裂纹的锆石晶体或避开锆石中的裂纹和包裹体。

锆石SHRIMP U-Pb分析西澳大利亚珀斯科庭大学离子探针中心实验室的SHRIMP-II上采用标准测定程序进行,详细的实验流程和原理参考宋彪(2002)。应用澳大利亚国家地质局标准锆石TEM(417 Ma)进行年龄校正,应用的标准锆石为91500($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1\,065.4 \pm 0.6$ Ma, Wiedenbeck *et al.*, 1995)标定所测锆石的U、Th和Pb含量。普通铅根据实测 ^{204}Pb 进行校正。有关年龄数据处理和绘图采用SQUID及ISOPLOT程序(Ludwig, 2001, 2003)。单个数据点的误差均为 1σ ,采用年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值为95%的置信度。

4 测年结果

花岗质糜棱岩(805012b)样品的锆石主要有两类:一类以椭圆粒状或次圆短柱状为主,粒度相对较大,晶体较完整未发生明显断裂,普遍在100~300 μm 之间,长宽比约为3:1;另一类以半自形-自形短柱状为主,柱面、锥面均可见,普遍发生断裂,晶体

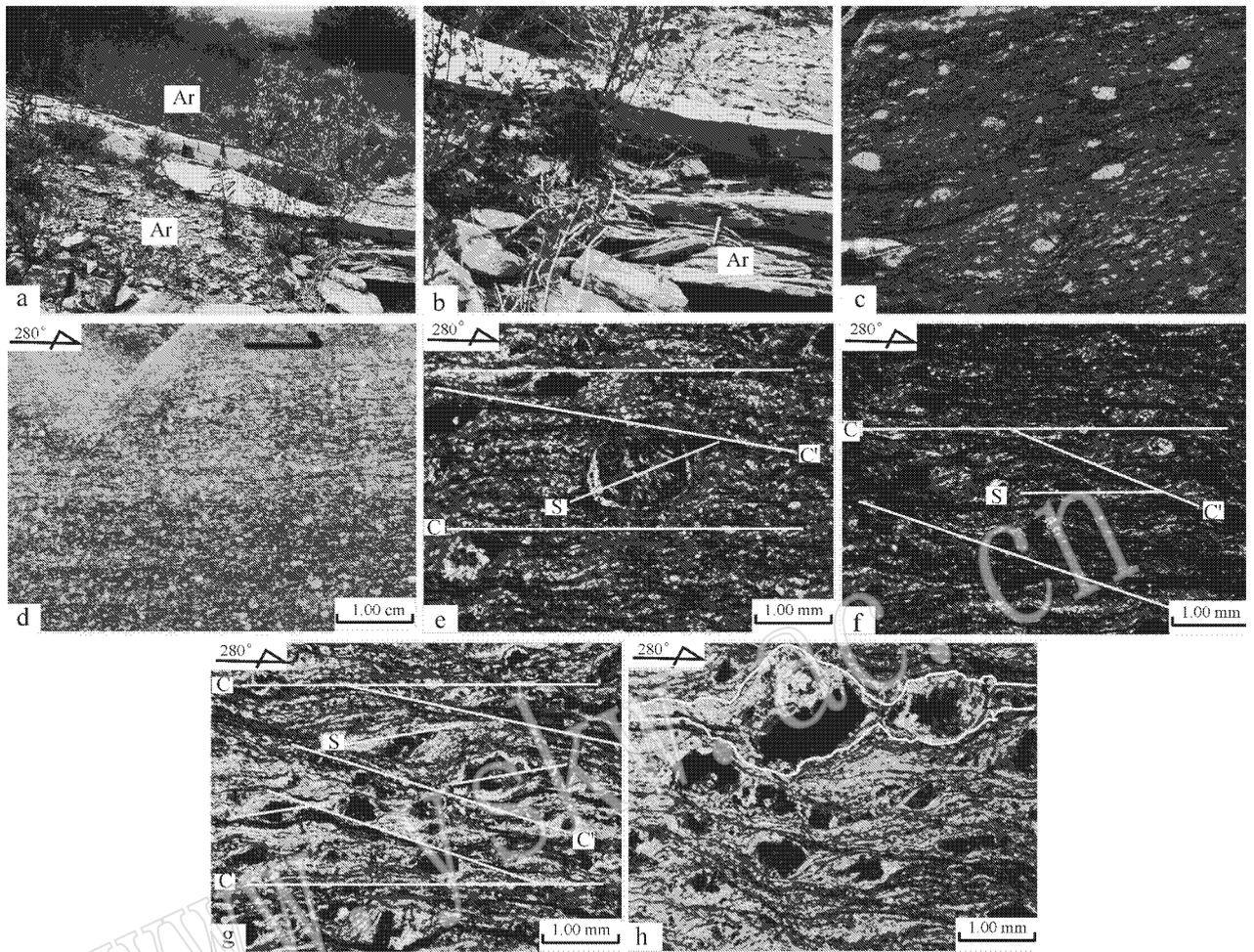


图 2 糜棱状花岗岩脉体宏观及显微构造特征

Fig. 2 Macrostructure and microstructure of the mylonitized granite vein

a—糜棱状花岗岩脉野外宏观产状，脉体沿围岩的糜棱面理灌入；b—脉体与围岩的接触界线截然，具有侵入关系的特点；c—糜棱状花岗岩脉的围岩为糜棱状太古宙片麻岩，长石呈眼球状，手标本；d—测年样品手标本 XZ 面特征，发育糜棱状结构和条带状构造，长石呈眼球状，其应变测量结果显示自然应变 $\gamma=2.32$ ，付林参数 $K=0.83$ ，罗德参数 $\nu=0.09$ ，应变强度 $E_s=0.71$ ，运动学涡度 $W_k=0.89$ ；e—糜棱状花岗岩脉样品显微照片，斜长石 δ 组结构与石英亚颗粒共生，S-C-C' 组构，正交偏光；f—糜棱状花岗岩脉样品显微照片，石英动态重结晶条带，S-C-C' 组构，正交偏光；g—糜棱状花岗岩脉样品显微照片，S-C-C' 组构，长石碎斑，单偏光；h—糜棱状花岗岩脉样品显微照片，长石被韧性拉成布丁状，显示韧性变形，单偏光

a—field attitude of the mylonitized granite vein, which intruded along the mylonitic foliation of the wall rock; b—contact boundary between the vein and its wall rock, with obvious invasive characteristics; c—augen structure of the mylonitized Achaean gneiss; d—augen and banded structures of the vein, the results of strain measurement on smooth surface being $\gamma=2.32$, $K=0.83$, $\nu=0.09$, $E_s=0.71$, $W_k=0.89$; e—photomicrographs of the mylonitized granite sample, δ fabric of plagioclase, sub-grains of quartz and S-C-C' fabric, crossed nicols; f—photomicrographs of the mylonitized granite sample, dynamic recrystallization of quartz bands, crossed nicols; g—microphotographs of the mylonitized granite sample, S-C-C' fabric and plagioclase porphyroclast, plainlight; h—microphotographs of the mylonitized granite sample, pudding fabric of plagioclase, showing ductile deformation, plainlight

表 1 围岩与脉体应变测量数据表

Table 1 Strain measurement data of the vein and its wall rock

样品编号	岩性	R_{XZ}	R_{YZ}	X	Y	Z	γ (自然应变)	K (付林参数)	ν (罗德参数)	E_s (应变强度)	W_k (运动学涡度)
805065d(围岩)	糜棱岩化片麻岩	2.33	1.44	1.56	0.96	0.7	2.06	1.35	-0.15	0.60	0.93
805012h(脉体)	花岗质糜棱岩	2.71	1.83	1.59	1.00	0.6	2.32	0.83	0.09	0.71	0.89

$$\gamma = X/Y + Y/Z - 1, K = \ln(X/Y) / \ln(Y/Z), \nu = (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_3), E_s = \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} / 3^{1/2}$$

不完整，一般为浅黄白色半透明状，少量呈无色，粒度在 30~150 μm 之间，长宽比约为 4:1 到 5:1。阴

极发光显示(图 3)，前者晶形不太清楚，显示有较清晰的核边环带结构，普遍具有较宽的浅色次生边，

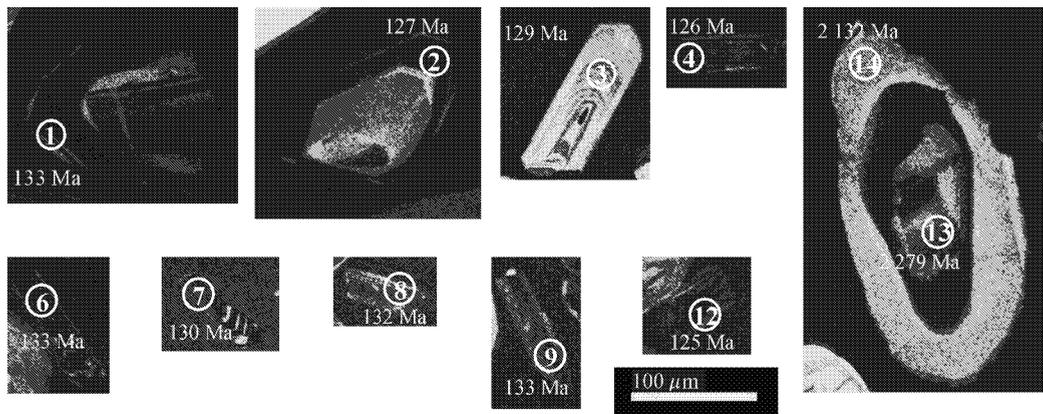


图 3 糜棱状花岗岩(805012b)锆石阴极发光图像及定年

Fig. 3 CL images and ages of zircons for mylonitized granite

指示在后期变质作用过程中有生长,应为俘获或继承锆石;后者阴极发光图像下环带清晰,通常层数多但并不宽,具有较高的对称性,各层环带结构近一致,没有明显的核,显示出较清晰的岩浆生长环带和韵律结构,为典型的岩浆锆石。

在透射光、反射光以及阴极发光图像下精选 13 颗锆石进行了 14 个测点分析,详细数据见表 2。在第一类锆石中挑出 1 个典型的锆石(805012b-3)对其边部和核部分别进行了分析,核部年龄为 2 205 Ma(高 Th/U),边部年龄为 2 132 Ma,其年龄与该区获得的古元古代辽河群的花岗质片麻岩的年龄一致(Luo *et al.*, 2004),结合阴极发光图像表明该类锆石为俘获或继承锆石,这种锆石反映辽南地区基底的特征,对该区基底的年代有一定的限定意义。对

第二类锆石进行了 12 个测点分析,点 5.1 和 10.1 由于 ^{204}Pb 含量异常高,计算中不予考虑,其余 10 个点集中分布于一致曲线上(图 4), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 129 ± 2 Ma(MSWD = 1.6)。这一结果可解释为该组锆石的结晶年龄,可代表该糜棱岩化花岗岩的侵位年龄。

5 讨论

5.1 年代学意义:中生代韧性伸展拆离新证据

近年,在笔者对华北克拉通中生代变质核杂岩的研究过程中,一些证据显示,变质核杂岩核部的古老岩石(2 400 Ma)在太古宙时期发生较强烈的韧性变形,甚至在拆离断层中也有迹象显示发育有古老

表 2 糜棱状花岗岩(805012b) SHRIMP U-Pb 分析结果
Table 2 SHRIMP U-Pb data of zircons from the mylonitized granite(805012b)

分析点	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$				Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			年龄/Ma					
	/%	$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
805012b-1.1	0.06	48.5	2 695	348	0.13	0.048 3	1.4	0.14	2.7	0.020 9	2.2	115	34	130	5	133.5	3.0
805012b-2.1	0.21	34.8	2 037	318	0.16	0.048 4	1.8	0.13	3.3	0.019 8	2.8	119	41	117	5	126.7	3.5
805012b-3.1	0.90	1.6	89	21	0.24	0.048 8	20.2	0.14	20.5	0.020 1	3.6	140	473	112	41	128.6	4.6
805012b-4.1	0.11	18.6	1 096	603	0.57	0.048 6	2.1	0.13	3.1	0.019 7	2.3	126	48	123	3	125.8	2.9
805012b-5.1	2.94	25.1	1 149	812	0.73	0.046 8	10.6	0.16	10.9	0.024 7	2.4	37	254	152	9	157.3	3.7
805012b-6.1	0.05	32.2	1 791	1 103	0.64	0.047 0	1.5	0.14	2.7	0.020 9	2.3	50	35	129	3	133.3	3.0
805012b-7.1	0.46	24.1	1 373	644	0.48	0.046 7	4.1	0.13	4.7	0.020 3	2.3	33	99	129	7	129.6	2.9
805012b-8.1	0.56	10.8	605	242	0.41	0.045 7	5.9	0.13	6.4	0.020 7	2.4	-19	144	122	7	131.9	3.1
805012b-9.1	0.62	11.0	611	305	0.51	0.046 5	5.8	0.13	6.3	0.020 9	2.4	24	139	133	7	133.3	3.1
805012b-10.1	1.57	12.8	635	256	0.42	0.043 2	10.6	0.14	10.9	0.023 1	2.5	-155	263	137	14	147.5	3.7
805012b-11.1	0.13	17.8	1 072	857	0.83	0.048 4	2.0	0.13	3.1	0.019 3	2.3	119	47	119	3	123.1	2.8
805012b-12.1	0.05	17.6	1 043	706	0.70	0.047 1	2.7	0.13	3.5	0.019 7	2.3	55	64	122	4	125.7	2.9
805012b-13.1	0.00	55.2	152	180	1.23	0.138 2	0.8	8.08	2.5	0.424 0	2.3	2 205	14	2 221	54	2 278.7	45.0
805012b-14.1	0.03	50.7	150	112	0.77	0.010 6	1.9	5.75	3.1	0.392 1	2.4	1 739	35	1 856	63	2 132.7	44.1

注: $^{206}\text{Pb}_c$ 指普通铅中 ^{206}Pb 占全铅 ^{206}Pb 的百分数; Pb^* 为放射性成因铅,普通铅用 ^{204}Pb 校正。

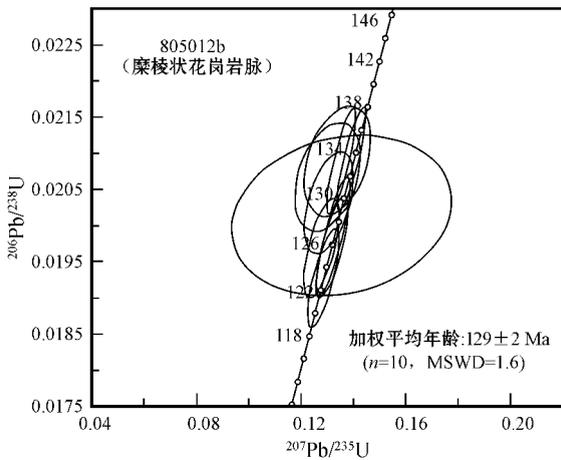


图4 糜棱状花岗岩(805012b)锆石 SHRIMP 年龄谱和图

Fig. 4 Concordia diagram of zircon SHRIMP U-Pb isotopic data for the mylonitized granite(805012b)

的韧性剪切带(曾令森等,未发表资料)。由此提出以下问题:变质核杂岩韧性变形带全都是在核杂岩发育时形成的吗?该如何鉴别古老韧性剪切带和核杂岩形成时叠加的新生剪切带?本文研究的糜棱状花岗岩脉侵入辽南变质核杂岩主拆离断层(金州拆离断层)中并与围岩太古宙片麻岩一起发生强烈透入性韧性变形,岩石结构具有同侵位变形特点,岩脉的侵位年龄为 129 ± 2 Ma。该年龄明显老于前人获得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、K-Ar 年龄。例如,韧性剪切带糜棱岩中的角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $121.7 \sim 109.9$ Ma(Yang *et al.* , 2007 ; Lin *et al.* , 2008 ; 杨进辉等, 2008) 黑云母年龄为 $124.1 \sim 109$ Ma(Yin and Nie , 1996 ; Yang *et al.* , 2007 ; Lin *et al.* , 2008 ; 杨进辉等, 2008) , 钾长石年龄为 $114.7 \sim 108.2$ Ma(Yang *et al.* , 2007 ; 杨进辉等, 2008) , 白云母 K-Ar 年龄为 $118.2 \sim 103.3$ Ma(曾令森等, 1996a ; 杨进辉等, 2008) (表 3)。

众所周知,角闪石和黑云母 Ar-Ar 年龄常常反映深层次变质变形晚期阶段的冷却年龄。而且,矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、K-Ar 体系易受后期热事件的干扰和影响(Reddy and Potts , 1999)。因此,这些 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、K-Ar 年龄不能提供伸展变形是何时开始的年代学信息。

通过测定侵入核杂岩核部的花岗岩岩体的锆石年龄有可能限定早期韧性伸展变形时限。Wu (2005) 运用 LA-ICPMS 测得辽南变质核杂岩核部赵屯岩体的年龄为 128 ± 5 Ma, 纪沫等(2009) 根据赵屯岩体被拆离作用改造为构造片麻岩, 确定辽南地

区的伸展作用至少开始于 130 Ma, 但该岩体是否具有同构造性质还有待于进一步研究证实。花岗岩与主期构造的时间关系即同构造花岗岩的鉴别对区域构造演化分析至关重要(Schulmann *et al.* , 1996 ; Paterson *et al.* , 1998 ; Schofield and DeLeon 's 1998)。本文研究的糜棱状花岗岩脉体明显具有同构造的特点(如前所述), 变形程度远大于赵屯岩体。这至少提供了两个重要证据: ①中生代的确发生过强烈的韧性伸展拆离作用; ②它的年龄至少证明最晚在 129 Ma 岩脉侵入时就已经开始了伸展变形作用, 为辽南变质核杂岩至少在 130 Ma 开始发育的认识(纪沫等, 2009) 提供了新证据, 同时说明辽南变质核杂岩核部的赵屯岩体可能也具有同构造性质, 两者变形程度的差异应该是因为脉体侵入到拆离断层带内, 赵屯岩体距拆离带较远所致。

辽南地区早白垩世相关花岗岩的所获得的锆石年代学资料显示(表 3) 辽南地区同构造花岗岩最早侵位的是本文所测脉体和赵屯岩体, 时代在 130 Ma 左右, 最晚侵位的是饮马湾山南部的赵房岩体, 时代为 113 ± 2 Ma(纪沫等, 2009)。由于该岩体未遭受变形, 因而限制了辽南变质核杂岩中生代韧性伸展变形的上限为 113 Ma(纪沫等, 2009)。113 Ma 以后, 金州拆离断层的韧性伸展结束, 辽南变质核杂岩经历整体的隆升和冷却过程。前人获得的 113~103 Ma 的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、K-Ar 年龄记录的应该是辽南变质核杂岩隆升冷却年龄。

上述年代学资料表明, 辽南金州地区的韧性变形发生在早白垩世, 图 5 直观地反映了辽南变质核杂岩的整个发育过程。130 Ma 以前金州拆离断层开始活动, 深部发生韧性剪切变形; 130~120 Ma, 辽南变质核杂岩快速隆升, 同构造岩浆侵位(在 125~120 Ma 达到峰值) 并影响拆离断层的发育; 120~110 Ma, 金州拆离断层活动减弱, 隆升至近地表, 花岗岩体浅层侵位, 黑云母等低温矿物冷却; 110~100 Ma 以后, 辽南变质核杂岩经历整体隆升与冷却。

5.2 构造意义

金州断层和董家沟断层是纵贯辽东半岛的区域性大断层。对于这两条断层的研究, 早期的研究者将 NNE 向的金州断层解析为切割 NEE 向滑脱推覆构造的高角正断层(许志琴等, 1991; 曾令森等, 1996a, 1996b)。近期的研究者则将两条断层视为辽南变质核杂岩的同一拆离断层, 两者在金州附近汇合(Liu *et al.* , 2005 ; Lin *et al.* , 2007 , 2008 ; Yang

表 3 辽南变质核杂岩相关年龄数据表

Table 3 Age data of metamorphic core complex in southern Liaoning

样号	地点部位/岩体名称	岩石类型	年龄/Ma	测试对象	方法	资料来源
	剪切带	糜棱岩	112.9±0.4	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yin 和 Ni(1996)
	剪切带	糜棱岩	110.4±0.4	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yin 和 Ni(1996)
	剪切带	糜棱岩	112.3±0.4	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yin 和 Ni(1996)
	剪切带	糜棱岩	111.5±.07	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yin 和 Ni(1996)
	剪切带	糜棱岩	110.6±0.5	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yin 和 Ni(1996)
	剪切带	糜棱岩	112.9±0.2	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yin 和 Ni(1996)
93-R-7	基底	片麻岩	114.5±6.2	白云母	40K- ⁴⁰ Ar	曾令森等(1996a)
93-C-3	剪切带	糜棱岩	118.2±0.2	白云母	40K- ⁴⁰ Ar	曾令森等(1996a)
93-C-1	剪切带	糜棱岩	103.3±0.2	白云母	40K- ⁴⁰ Ar	曾令森等(1996a)
JH-62	拆离带	变形镁铁质岩脉	111.8±2.9	角闪石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-62	拆离带	变形镁铁质岩脉	112.4±3.1	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-66	拆离带	糜棱岩化 TTG	114±3.0	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-67	拆离带	糜棱岩化 TTG	110.6±2.9	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-67	拆离带	糜棱岩化 TTG	109.7±5.2	钾长石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-70	拆离带	糜棱岩化黑云斜长片麻岩	112.5±3.0	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-70	拆离带	糜棱岩化黑云斜长片麻岩	114.7±6.0	钾长石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-72	拆离带	糜棱岩化黑云斜长片麻岩	109.8±4.5	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-74	拆离带	含石榴石白云母花岗岩	111.6±1.0	白云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-74	拆离带	含石榴石白云母花岗岩	108.2±4.4	钾长石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-75	核部	镁铁质糜棱岩	109.9±3.4	角闪石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-75	核部	镁铁质糜棱岩	113.9±3.0	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2007)
JH-50	徐屯断裂下盘	花岗质糜棱岩	112.9±0.7	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2008)
JH-50	徐屯断裂下盘	花岗质糜棱岩	114.1±1.2	钾长石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2008)
JH-54	徐屯断裂下盘	花岗质糜棱岩	114.4±0.7	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2008)
JH-58	庙岭	变形闪长岩	119.6±0.8	角闪石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2008)
JH-58	庙岭	变形闪长岩	113±0.6	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2008)
JH-34	古道岭	未变形的二长花岗岩及其所含镁铁质包体	121.6±1.0	角闪石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2008)
JH-34	古道岭	未变形的二长花岗岩及其所含镁铁质包体	112.8±0.8	钾长石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Yang 等(2008)
LN 83	拆离带	糜棱状花岗闪长岩	121.7±1.6	闪石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Lin 等(2008)
LN 85	拆离带	糜棱状花岗闪长岩	116.4±1.5	闪石	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Lin 等(2008)
LN 110	七星台山	花岗岩	118.7±1.2	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Lin 等(2008)
LN 56	基底	正片麻岩	124.1±2.2	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Lin 等(2008)
LN 93	下盘	片麻状混合岩	121.3±1.2	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Lin 等(2008)
LN 66	下盘	片麻状混合岩	117.7±1.2	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Lin 等(2008)
LN 71	下盘	正片麻岩	116.9±1.4	黑云母	⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	Lin 等(2008)
FW01-57	赵屯	细粒二长花岗岩	128±5	锆石	LA-ICPMS	Wu 等(2005)
FW02-41	双塔	似斑状花岗岩	129±2	锆石	LA-ICPMS	Wu 等(2005)
FW04-315	亮甲店	细粒花岗岩脉	128±2	锆石	LA-ICPMS	Wu 等(2005)
FW01-38	庙岭	石英闪长岩	127±4	锆石	LA-ICPMS	Wu 等(2005)
FW01-18	万家岭	花岗闪长岩	121±2	锆石	LA-ICPMS	Wu 等(2005)
FW01-21	古道岭	似斑状花岗岩	118±3	锆石	LA-ICPMS	Wu 等(2005)
FW01-26	古道岭	细粒二长花岗岩	122±2	锆石	LA-ICPMS	Wu 等(2005)
FW04-301	古道岭	闪长质包体	120±1	锆石	LA-ICPMS	Wu 等(2005)
FW04-303	古道岭	闪长质包体	121±2	锆石	LA-ICPMS	Wu 等(2005)
JH-35	古道岭	闪长质包体	121±3	锆石	LA-ICPMS	Wu 等(2005)
FW01-57	石庙山	闪长岩	120±2	锆石	TMS	Wu 等(2005)
SK14-1	洼子店	细粒二长花岗岩	120±4	锆石	LA-ICPMS	郭春丽等(2004)
FW02-39	饮马湾山	细粒二长花岗岩	122±6	锆石	LA-ICPMS	郭春丽等(2004)
SK11-1	饮马湾山	片麻状花岗闪长岩	122±2	锆石	LA-ICPMS	郭春丽等(2004)
SK11-1	饮马湾山	片麻状花岗闪长岩	125±2	锆石	TMS	郭春丽等(2004)
SK11-4	饮马湾山	细粒二长花岗岩	123±4	锆石	LA-ICPMS	郭春丽等(2004)
SK11-4	饮马湾山	细粒二长花岗岩	120±4	锆石	TMS	郭春丽等(2004)
SL0543	饮马湾山	二长花岗岩	124±3	锆石	SHRIMP	纪沫等(2009)
SL0536	赵房	花岗闪长斑岩	113±2	锆石	SHRIMP	纪沫等(2009)
805012b	金州拆离断层带	糜棱岩化花岗岩脉	129±2	锆石	SHRIMP	本文

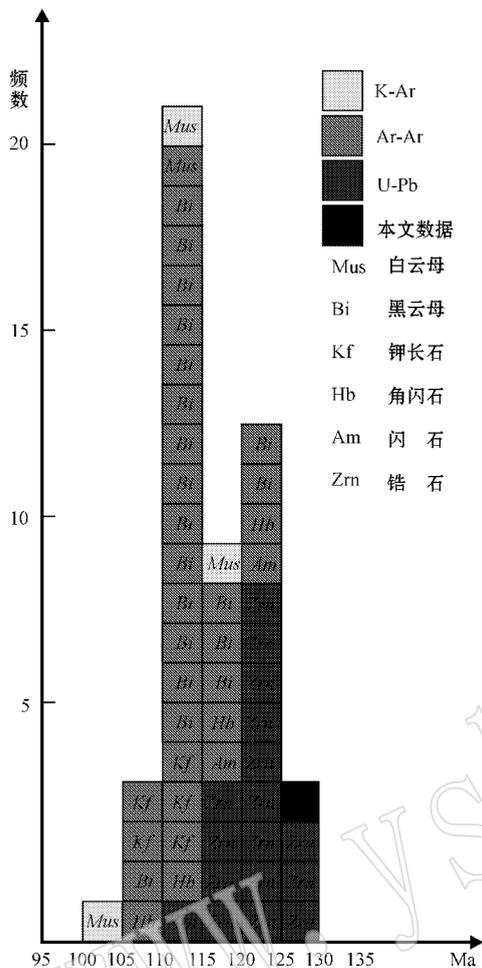


图 5 辽南变质核杂岩年龄数据统计直方图
(数据来源见本文和表 3)

Fig. 5 Histogram showing the distribution of the ages of metamorphic core complexes in southern Liaoning (data from this text and Table 3)

et al., 2007; 纪沫等, 2008)。据我们最近的研究, 金州断层具有微角砾岩与断层泥等浅层次构造岩, 平行于下伏糜棱岩中的同向伸展褶劈理(C'), 为一伸展拆离断层。董家沟断层平行下伏糜棱岩的糜棱面理(C), 缺少浅层次构造岩, 虽然晚期具有伸展组份, 总体为一缩短性滑脱面。两断层的早期糜棱岩部分原为一体 构成滑脱-逆冲推覆构造体系的底部缩短韧性剪切带, 后期金州断层沿一同向伸展褶劈理(NNE)发育成伸展拆离断层, 切断初始与之同源的北东向董家沟断层, 金州拆离断层的形成及其东侧的隆起标志着辽南构造体制从缩短到伸展的转折(郑亚东等 2009)。结合本文测试结果, 说明辽南地区在 129 Ma 左右已经转换为伸展构造体制。

根据前人研究(朱光等, 1995, 2001; 陈宣华等,

2000; 刘德良等, 2002; 汪勇生等, 2005), 郯庐断裂于 118~130 Ma 期间曾发生过一次大的走滑活动, 并伴有强烈的酸性岩浆侵入活动, 这基本上与辽南变质核杂岩的演化历史相符。因此, 本区的伸展作用可能与郯庐断裂的走滑作用有关, 或郯庐断裂的走滑可能是中国东部地区于早白垩世发生了大规模的伸展作用的又一种浅层表现形式(陈根文等, 2008), 更可能是整个东亚大陆晚中生代伸展的显示。

6 结论

(1) 辽南金州拆离断层带中发育糜棱岩化花岗岩脉, 构造分析显示该脉体发生强烈透入性韧性伸展变形, 为同构造变形脉体。应变类型以平面应变为主, 剪切作用类型为以简单剪切为主的一般剪切。

(2) 采用锆石 SHRIMP U-Pb 定年方法, 获得同构造变形的糜棱岩化花岗岩脉的年龄为 129 ± 2 Ma ($n = 10$, MSWD = 1.6), 证明最晚在 129 Ma 岩脉侵入时辽南变质核杂岩就已经开始了伸展剪切变形作用并已经从缩短构造体制转换到伸展构造体制。

致谢 感谢郑亚东教授在野外工作过程中的指导和童英博士在成文过程中有益讨论以及审稿人对本文提出的建议和修改意见。

References

Chen Genwen, Xia Huang and Chen Shaoqing. 2008. The geological evidences for the tectonic transition in late Mesozoic in North China [J]. *Geology in China*, 35(6): 1 162~1 177 (in Chinese with English abstract).

Chen Xuanhua, Wang Xiaofeng, Zhang Qing, *et al.* 2000. Geochronologic study on the formation and evolution of Tanlu fault [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(3): 215~220 (in Chinese with English abstract).

Davis G A, Qian X, Zheng Y, *et al.* 1994. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunneng Shan: A metamorphic core complex north of Beijing, China [A]. Harrison M and Yin A. *Rubey Volume: Tectonics of Asia* [C]. Cambridge Univ. Press: 253~280.

Darby B J, Davis G A and Zheng Y. 2001. Evolving geometry of the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia China [J]. *Geol. Soc. America Abstracts with Programs*, 33(3): A~32.

Darby B J, Davis A D, Zhang X H, *et al.* 2004. The newly discovered Waziyu metamorphic core complex, Yiwulishan, Western Liaoning Province, Northeast China [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 145~155.

Donskaya V, Windley B F, Mazukabzov A M, *et al.* 2008. Age and

- evolution of late Mesozoic metamorphic core complexes in southern Siberia and northern Mongolia[J]. *Journal of Geological Society of London*, 165(1): 405~421.
- Guo Chunli, Wu Fuyuan, Yang Jinhui, *et al.* 2004. The extensional setting of the Early Cretaceous magmatism in eastern China: example from the Yinmawanshan pluton in southern Liaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1 193~1 204(in Chinese with English abstract).
- Ji Mo, Hu Ling, Liu Junlai, *et al.* 2008. Characteristics and origin of corrugation in the South Liaoning metamorphic core complex[J]. *Chinese Journal of Geology*, 43(1): 12~22(in Chinese with English abstract).
- Ji Mo, Liu Junlai, Hu Ling, *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb age of Yinmawanshan and Zhaofang pluton in South Liaoning metamorphic and its geological implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 173~181(in Chinese with English abstract).
- Lin Wei, Faure M, Monie P, *et al.* 2007. Polyphase Mesozoic tectonics in the eastern part of the North China Block: Insights from the eastern Liaoning Peninsula massif(NE China) [A]. Zhai M G. *Mesozoic Sub-Continental Lithosphere Thinning Under Eastern Asia* [C]. London: Geological Society London, Special Publications, 280: 153~169.
- Lin Wei, Faure M, Monie P, Schärer U, *et al.* 2008. Mesozoic extensional tectonics in Eastern Asia: The south Liaodong peninsula metamorphic core complex(NE China) [J]. *The Journal of Geology*, 116: 134~154.
- Liu Junlai, Davis G A, Lin ZY, *et al.* 2005. The Liaonian metamorphic core complex, southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of eastern Liaoning, Korea and contiguous areas[J]. *Tectonophysics*, 407: 65~80.
- Liu Junlai, Guan Huimei, Ji Mo, *et al.* 2006. Late Mesozoic metamorphic core complex: New constraints on Lithosphere thinning in North China [J]. *Progress in Natural Sciences*, 16(1): 21~26(in Chinese).
- Liu Deliang, Cao Gaoshe, Li Zhensheng, *et al.* 2002. Duration time of structural deformation for the ductile shear zone in the south of Tancheng-Lujiang fault[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 475~482(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. *Squid 1. 02: A user manual* [A]. Berkeley Geochronological Center Special Publication [C]. 2: 19.
- Ludwig K R. 2003. *User's manual for Isoplot 3.0, a geochronological toolkit for Microsoft Excel* [A]. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication [C]. 4: 25~32.
- Luo Yan, Sun Min, Zhao Guochun, *et al.* 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohé Group in the Eastern Block of the North China Craton: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt [J]. *Precambrian Research*, 134: 49~371.
- Lu Xiaoping, Wu Fuyuan, Lin Jingqian, *et al.* 2004. Geochronological framework of Precambrian magmatism in the southern Liaodong Peninsula: Constraints on the crustal evolution of North China Craton [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 39: 123~138(in Chinese with English abstract).
- Ma Yinsheng, Cui Shengqin, Wu Ganguo, *et al.* 1999. The Structural Feature of Metamorphic Core Complex in Yiwulüshan Mountains, West Liaoning [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(4): 385~391(in Chinese with English abstract).
- Miller R B & Paterson S R. 1994. The transition from magmatic to high-temperature solid-state deformation: Implication from the Mount Stuart batholiths, Washington [J]. *Journal of Structural Geology*, 16: 853~865.
- Paterson S R, Vernon R H & Tobisch O T. 1989. A review of the criteria for the identification of magmatic and tectonic foliation [J]. *Geology*, 11: 349~363.
- Paterson S R, Fowler T K Jr, Schmidt K L, *et al.* 1998. Interpreting magmatic fabric patterns in Plutons [J]. *Lithos*, 48: 53~82.
- Reddy S M and Potts G J. 1999. Constraining absolute deformation ages: the relationship between deformation mechanisms and isotope systematics [J]. *Journal of Structural Geology*, 21(8/9): 1 255~1 265.
- Schulmann K, Mlcoch B and Melka R. 1996. High-temperature microstructures and rheology of deformed granite, Erzgebirge, Bohemian Massif [J]. *Journal of Structural Geology*, 18(6): 19~33.
- Schofield D L and DeLeon 's R S. 1998. Relationships between syn-tectonic granite fabrics and regional P-T-t paths: an example from the Gander-Avalon boundary of NE Newfoundland [J]. *Strat. Geol.*, 20: 459~471.
- Song Biao, Zhang Yuhai and Wan Yusheng. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating [J]. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26~30(in Chinese).
- Wang Xinshe, Zheng Yadong, Zhang Jinjiang, *et al.* 2002. Extensional kinematics and shear type of the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia [J]. *Regional Geology of China*, 21(4/5): 238~245(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao and Zheng Yadong. 2002. Mesozoic progressive transition from overthrusting to extension in the Sino-Mongolian border region and crustal-scale tangential shear [J]. *Geological Bulletin of China* 21(4/5): 232~237(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Zheng Yadong, Li Tianbing, *et al.* 2004. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and their implications for crustal growth [J]. *Asia Earth Science*, 23: 715~729.
- Wang Tao, Zheng Yadong, Zhang Jinjiang, *et al.* 2007a. Some problems in the study of Mesozoic extensional structure in the North China craton and its significance for the study of lithospheric thinning [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1 155~1 166(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Wang Xiaoxia, Zheng Yadong, *et al.* 2007b. Studies on structures of granitic plutons and granitic tectonic dynamics [J]. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 91~113(in Chinese with English abstract).
- Wang Yongsheng, Zhu Guang, Chen Wen, *et al.* 2005. Thermochronologic information from the Tan-Lu fault zone and its relationship with the exhumation of the Dabie Mountains [J]. *Geochimica*, 34(13): 193~214(in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses [J]. *Geostandard Newsletters*, 19(1): 1~23.
- Wu Fuyuan, Lin J Q, Wilde S A, *et al.* 2005a. Nature and significance of Early Cretaceous giant igneous event in eastern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1~2): 103~119.
- Xu Zhiqin, Li Haibing, Wang Zongxiu, *et al.* 1991. Crustal contraction and extension in southern Liaoning [J]. *Geological Review*, 37(3): 193~200(in Chinese with English abstract).

- 193~202(in Chinese).
- Yang Zhongzhu, Meng Qingcheng, Gang Jiang, *et al.* 1996. The metamorphic core-complex structure in south Liaoning[J]. *Liaoning Geology*, (4): 241~250(in Chinese).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al.* 2007. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex: Inferences from Ar/Ar thermochronology and implications for Late Mesozoic extension in the eastern North China Craton[J]. *GSA Bulletin*, 119(11~12): 1405~1414.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, *et al.* 2008. The extensional geodynamic setting of Early Cretaceous granitic intrusions in the eastern North China Craton: Evidence from laser ablation- $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of K-bearing minerals[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1175~1184(in Chinese with English abstract).
- Yin A and Nie S Y. 1996a. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions[A]. Yin A and Harrison T A. *The Tectonic Evolution of Asia*[C]. Cambridge University Press, New York: 442~485.
- Zeng Lingsen and Li Haibing. 1996a. Structural deformation and fluid process in Jinzhou region, south Liaoning province[J]. *Geological Journal of University*, 2(2): 155~165(in Chinese with English abstract).
- Zeng Lingsen, Li Haibing and Xu Zhiqin. 1996b. Fractal and self-organization developed in ductile deformation in the crust of southern Liaoning[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(3): 269~275(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Zheng Yadong and Liu Shuwen. 1998. The Xiaqingling Matamorphic Core Complex: Structure, Genetic Mechanism and Evolution[M]. Beijing: Marine Press, 120(in Chinese).
- Zheng Yadong, Wang Shizheng and Wang Yufang. 1991. An enormous thrust-nappe and extensional metamorphic core complex newly discovered in the Sino-Mongolian boundary area[J]. *Science in China (B)*, 34(9): 1146~1152.
- Zheng Yadong and Zhang Qing. 1994. The Yagan metamorphic core complex and extensional detachment fault in Inner Mongolia[J]. *Acta Geological Sinica*, 7(2): 125~135.
- Zheng Yadong, Zhang Qing, Wang Yufang, *et al.* 1996. Great Jurassic thrust sheets in Beishan (North Mountains) Gobi areas of China and southern Mongolia[J]. *J. Struct. Geol.*, 18(9): 1111~1126.
- Zheng Yadong, Zeng Lingsen, Li Jianbo, *et al.* 2009. Mesozoic orogenic contractional decollement and late-orogenic extensional detachment in the southern Liaoning Peninsula[J]. *Chinese Journal of Geology*, 44(3): 811~824(in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Xu Jiawei and Sun Shiqun. 1995. Isotopic age evidence for the timing of strike-slip movement of the Tan-Lu fault zone[J]. *Geological Review*, 41: 452~456(in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Song Chuanzhong, Wang Daoxuan, *et al.* 2001. Studies on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of strike-slip time of the Tan-Lu fault zone and their tectonic implications[J]. *Science in China (Series D)*, 44: 1002~1009(in Chinese).
- 地质证据[J]. *中国地质*, 25(6): 1162~1177.
- 陈宣华, 王小凤, 张青, 等. 2000. 郯庐断裂带形成演化的年代学研究[J]. *长春科技大学学报*, 30(3): 215~220.
- 郭春丽, 吴福元, 杨进辉, 等. 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[J]. *岩石学报*, 20(5): 1193~1204.
- 纪沫, 胡玲, 刘俊来, 等. 2008. 辽南变质核杂岩主拆离断层的波瓦状构造及其成因[J]. *地质科学*, 43(1): 12~22.
- 纪沫, 刘俊来, 胡玲, 等. 2009. 辽南变质核杂岩饮马湾山和赵府岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 25(1): 173~181.
- 刘俊来, 关会梅, 纪沫, 等. 2006. 华北晚中生代变质核杂岩构造及其对岩石圈减薄机制的约束[J]. *自然科学进展*, 16(1): 21~26.
- 刘德良, 曹高社, 李振生, 等. 2002. 郯庐断裂南段主断裂韧性剪切带形成历时时限的探索[J]. *地学前缘*, 9(2): 475~482.
- 路孝平, 吴福元, 林景任, 等. 2004. 辽东半岛南部早寒武纪花岗岩岩浆作用的年代学格架[J]. *地质科学*, 39(1): 123~138.
- 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 等. 1999. 医巫间山变质核杂岩构造特征[J]. *地球学报*, 20(40): 385~391.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 48(增刊): 26~30.
- 王涛, 郑亚东. 2002. 中蒙边界中生代推覆-伸展递进转换及地壳尺度的切向剪切[J]. *地质通报*, 21(4/5): 232~237.
- 王涛, 王晓霞, 郑亚东, 等. 2007a. 花岗岩构造研究及花岗岩构造动力学刍议[J]. *地质科学*, 42(1): 91~113.
- 王涛, 郑亚东, 张进江, 等. 2007b. 华北克拉通中生代伸展构造研究的几个问题及其在岩石圈减薄研究中的意义[J]. *地质通报*, 26(1): 1154~1166.
- 王新社, 郑亚东, 张进江, 等. 2002. 呼和浩特变质核杂岩伸展运动学特征及剪切作用类型[J]. *地质通报*, 21(4/5): 238~245.
- 王勇生, 朱光, 陈文, 等. 2005. 郯庐断裂带热年代学信息及其与大别造山带折返的关系[J]. *地球化学*, 34(3): 193~214.
- 许志琴, 李海兵, 王宗秀, 等. 1991. 辽南地壳的收缩作用及伸展作用[J]. *地质论评*, 37(3): 193~202.
- 杨进辉, 吴福元, 钟孙霖, 等. 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 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据[J]. *岩石学报*, 24(6): 1175~1184.
- 杨中柱, 孟庆成, 江江. 1996. 辽南变质核杂岩构造[J]. *辽宁地质*, (4): 242~250.
- 郑亚东, 王士政, 王玉芳. 1990. 中蒙边境区新发现的特大型推覆构造及伸展变质核杂岩[J]. *中国科学(B辑)*, 12: 1299~1305.
- 郑亚东, 曾令森, 李建波, 等. 2009. 辽南中生代造山期缩短滑脱与晚造山伸展拆离构造[J]. *地质科学*, 44(3): 811~824.
- 张进江, 郑亚东, 刘树文. 1998. 小秦岭变质核杂岩的构造特征、形成机制及构造演化[M]. 北京: 海洋出版社: 1107.
- 曾令森, 李海兵. 1996a. 辽南金州隆起区构造变形与流体作用[J]. *高校地质学报*, 2(2): 155~165.
- 曾令森, 李海兵, 许志琴. 1996b. 辽南地壳韧性剪切变形中的分形及自组织[J]. *地球学报*, 17(3): 269~275.
- 朱光, 徐嘉炜, 孙世群. 1995. 郯庐断裂带平移时代的同位素年龄证据[J]. *地质论评*, 41: 452~456.
- 朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 2001. 郯庐断裂带走滑时代的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其构造意义[J]. *中国科学(D辑)*, 31: 250~260.

附中文参考文献

陈根文, 夏换, 陈绍清. 2008. 华北地区晚中生代重大构造转折的