辽北法库韧性剪切带变形及其区域构造意义

王雷[1,2,3)],刘俊来[1)],滕超[4)],常玉巧[5)]

1)中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京,100083;
2)辽宁省地矿集团地质有限责任公司,沈阳,110032;
3)辽宁省地质矿产研究院有限责任公司,沈阳,110032;
4)辽宁有色勘察研究院有限责任公司,沈阳,110013; 5)云南省地震局,昆明, 650224

内容提要:晚古生代—早中生代古亚洲洋板块俯冲华北板块在辽北法库地区形成大型产状近水平的韧性剪切带。剪切带发展伴随着多期幔源及壳源的岩浆侵入,侵入岩在韧性剪切作用下发生韧性变形,记录了韧性剪切带变形历史。详细的野外地质调查结合岩石的宏观变形、显微构造及石英 c 轴组构特征分析,揭示了法库韧性剪切带内五龙山杂岩、高丽沟杂岩、早期十间房超单元变形处于上盘向北的剪切作用之下,晚期十间房超单元岩石变形指示构造运动转变为上盘向南剪切。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果显示高丽沟杂岩变形时间为 264.7±3.6 Ma(MSWD = 1.3),早期十间房超单变形时间为 253.9±4.3 Ma(MSWD = 3.3),晚期十间房超单元 244.0±3.0 Ma(MSWD = 1.9)。岩石地球化学特征表明早期十间房超单元及小房申岩体中部分岩石来源于部分熔融的岩石圈地幔。结合前人研究成果,我们认为华北板块北缘东段(辽北地区)晚二叠世(264.7~253.9 Ma)处于古亚洲洋板块俯冲华北板块作用之下;晚二叠世至早三叠世(253.9~244.0 Ma)构造体制转变为碰撞后伸展且逐渐停止,244.0±3.0 Ma 碰撞后伸展逐渐结束;构造体制转变并逐渐结束的过程是壳幔共同作用的结果,暗示了古亚洲洋板块的俯冲板片断离、重力失衡,这标志着辽北地区古亚洲洋构造域演化结束。

关键词:华北板块北缘; 法库韧性剪切带;同构造侵入岩;岩石变形;古亚洲洋板块

兴蒙造山带是位于西伯利亚板块和华北板块之间的一条古生代巨型造山带,即中亚造山带东段。兴蒙造山带形成之前,华北板块与西伯利亚板块之间是古亚洲洋板块及分布其上的诸多微陆块,晚古生代开始微陆块发生拼合(李双林等,1998;张兴洲等,2008; Yu Jiejiang et al. , 2012;邵济安等,2018),在华北板块北缘东段形成松嫩—张广才岭地块。华北板块北缘位于兴蒙造山带之南部,晚古生代—早中生代期间,随着古亚洲洋板块向华北板块俯冲消减,古亚洲洋板块、松嫩—张广才岭地块、华北板块之间发生复杂的相互作用,在华北板块北缘发生复杂的增生造山作用,形成陆缘增生带(王瑜,1996;邵济安等,1997;李双林等,1998; Xiao Wenjiao et al. , 2003;葛肖虹等,2009; 吕洪波等,2018),造山作用具有“软碰撞、弱造山”的特点(吴福元等,1995;任纪舜等,1999)。古亚洲洋板块俯冲消减及随后的碰撞造山、造山后伸展等一系列构造过程控制了该时期华北板块北缘的演化(李锦轶,1998;Li Jinyi,2006;曹花花等,2012;潘桂棠等,2016)。

作为连接华北板块与兴蒙造山带的枢纽,华北板块北缘是研究古亚洲洋闭合问题的重要构造单元,也是认识增生造山作用的重要实验室。尽管开展了大量研究工作,但目前对于华北板块北缘东段古亚洲洋最终闭合时间的认识尚不统一(崔玉良等,2019; 王金芳等, 2020),有学者认为是早古生代—晚古生代初(唐克东,1989; Yu Qian et al. , 2014),也有学者认为是早二叠世或者晚二叠世末—早三叠世(李锦轶,1998,2004; Jia Dacheng et al. ,2004;Cao Huahua et al. ,2013;汪相, 2018),甚至有学者认为是在白垩纪才最后闭合(吕洪波等,2018)。任何一个地质单元的发展演化过程都受到其所处的大地构造位置及深部过程的制约(牛树银

注:本文为国家自然科学基金重点资助项目“大陆中部地壳天然固态流变与应变局部化”(编号:41430211)的成果。
收稿日期:2019-11-14;改回日期:2020-06-14;责任编辑:刘志强。Doi:10.16509/j.georeview.2021.01.021
作者简介:王雷,男,1987 年生,高级工程师,硕士,主要从事区域构造与构造年代学研究; Email:rexwang@cugb.edu.cn。通讯作者:刘俊来,男,1960 年生,教授,博士生导师,主要从事区域构造、显微构造与岩石圈流变学研究; Email :jliu@cugb.edu.cn。

等,1996)。古亚洲洋板块演化也是岩石圈深部构造过程的响应,因此对于古亚洲洋板块的演化研究需要对岩石圈深部构造过程进行揭示。

法库韧性剪切带是古亚洲洋板块演化在华北板块北缘东段形成的大型高应变带(辽宁省地质矿产局区调队❶)。本次工作以该韧性剪切带为研究对象,通过详细的野外地质调查,结合剪切带宏观变形特征、显微构造、石英 *c* 轴组构分析以及年代学等方面的综合研究,揭示韧性剪切带变形过程,探讨晚古生代—早中生代期间古亚洲洋板块演化经历及岩石圈深部构造过程,为古亚洲洋在华北板块北缘东段(辽北地区)的最终闭合时间以及岩石圈深部构造过程问题的研究提供参考。

1 区域构造背景

法库韧性剪切带大地构造位置上处于华北板块北缘东段,南邻赤峰—开原深大断裂(图 1a)。区域地层主要有古生界、中生界以及新生界第四系。大型产状平缓的韧性剪切带构成了区域主要构造格架,控制了总体构造样式,岩石线理及槽中脊型擦痕指示剪切运动方向集中于 NNE—SSW 方向(图 1b)。前人工作将该韧性剪切带称为法库韧性剪切带,如今剪切带上盘已被剥蚀殆尽,出露于地表的是主剪切面之下的部分(杨晓波等,1996)。区域上岩浆岩按形成时代及岩石组合特征可划分为中二叠世五龙山杂岩、高丽沟杂岩,早—中三叠世十间房超单元、小房申岩体、梨树沟单元,晚三叠世花匠沟单元,中侏罗世红土墙子单元以及晚侏罗世石景山单元。除了红土墙子单元和石景山单元外,其余单元岩石均遭受韧性剪切作用,发生糜棱岩化。

2 韧性剪切带变形特征

法库韧性剪切带发展过程伴随着多期岩浆侵入,侵入岩记录了韧性剪切带的变形特征。韧性剪切带内发生韧性变形的侵入岩主要有五龙山杂岩、高丽沟杂岩、十间房超单元、小房申岩体、梨树沟单元和花匠沟单元。其中除了花匠沟单元岩外,其余岩石单元在岩体形态、总体变形特征、岩体边部构造形态、变形机制、显微构造等方面符合同构造侵入岩特征(张进江,1999;谢才富,2002)。不同阶段形成的同构造侵入岩记录了法库韧性剪切带发展的历史。

2.1 宏观变形特征

五龙山杂岩($W\gamma$):岩性主要为花岗闪长岩、闪长岩、二长花岗岩等,侵入古生界,接触处可见有大型窗棂构造(图 2a)。岩石糜棱岩化强烈,形成超糜岩,矿物颗粒细小,甚至难以分辨,偶见粒径约为 5 mm 的长石旋转碎斑,指示上盘向北剪切(图 2b)。面理发育程度好于线理(S>L),线理边界较模糊,倾伏向总体与韧性剪切方向相同。

高丽沟杂岩($G\delta c$):岩性主要为闪长岩、石英闪长岩等。岩石均遭受韧性剪切作而发生强烈的糜棱岩化,糜棱岩面理发育好于线理(S>L)。岩石中矿物颗粒多细小,石英被拉长,长石以脆性变形为主,角闪石不规则状,云母呈细小片状且分布不均。*XZ* 面上偶见粒径约为 5~10 mm 的长石 σ 旋转碎斑、S—C 组构、长石书斜构造等,指示剪切带的上盘向北运动(图 2c)。*XY* 面上云母分布较集中,且解理面均平行于糜棱叶理。

十间房超单元(T_1S):岩体呈带状分布,岩体长轴方向与韧性剪切方向近平行。岩性主要为花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩等。岩石糜棱岩化较强,石英被强烈拉长呈条状;长石呈粒状或不规则状,集合体定向分布呈条带状,偶见长石旋转碎斑;黑云母呈细小鳞片状,在 *XZ* 面上呈细条带状沿面理分布,云母解理面大多平行于 *XY* 面。拉长的石英条带、长石集合体、黑云母定向排列等构成的线理延伸方向与韧性剪切方向平行。该单元由三期侵入岩组成,自西向东年龄逐渐变老(辽宁省地质矿产局区调队❶)。野外调查沿 A—B 剖面,西侧年龄较新的岩石趋向于形成 SL 型构造,东侧年龄较老的岩石趋向于形成 L 型构造岩。石英 S—C 组构及长石旋转碎斑系指示上盘向南剪切为主(图 2d),局部上盘向北剪切。侵入高丽沟杂岩中的十间房超单元岩石边部变形强,向中部变形逐渐减弱直至消失(图 2e),表现出明显的同剪切特征,暗示了岩石经历了剪切作用逐渐减弱直至消失的过程。

小房申岩体(T_2X):岩性主要为辉长岩、闪长辉长岩。岩体规模较小,呈岩株状产出。岩石 *XY* 面上角闪石及辉石呈粒状或柱状定向分布,斜长石呈细粒化不规则状,局部见有少量平行于线理的石英条带状(图 2f),*YZ* 面上角闪石及辉石呈近圆形粒状,局部面理不清晰(图 2g)。岩石中线理发育程度好于面理(L>S),线理倾伏向总体平行于韧性剪切方向。

梨树沟单元(T_2L):岩性主要为粗粒二长花岗岩。岩石中矿物无韧性变形,钾长石呈自行长板状,长轴一般为 1.5~2.2 cm,定向分布,形成原生流线、

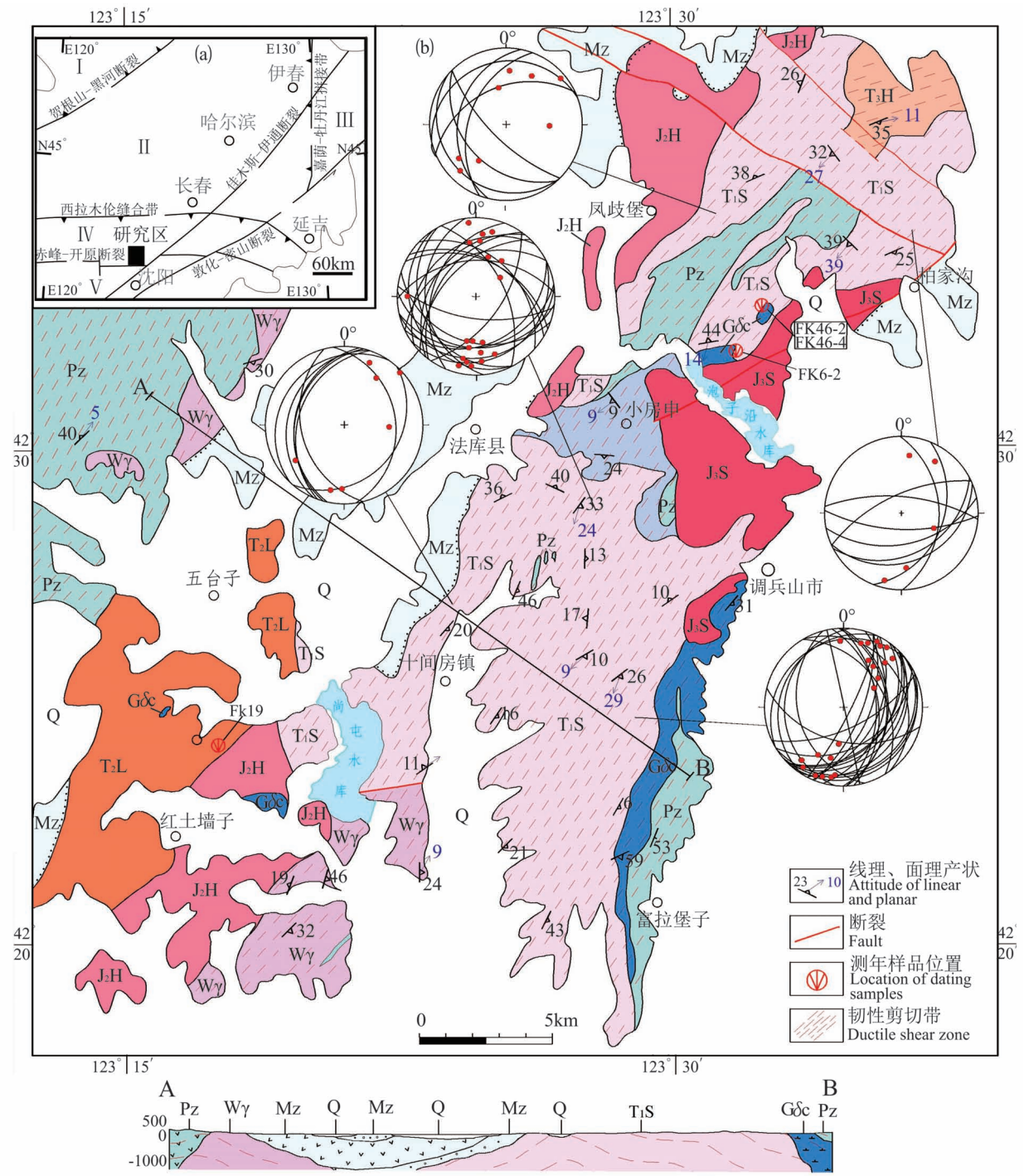


图 1 华北板块北缘东段法库地区大地构造位置(a) 和地质图(b,据辽宁省地质矿产局❶修改)

Fig. 1 Tectonic map (a) and geological sketch map(b, from Regional Geological Survey Team of Liaoning Geology and Mineral Resources Bureau, 1996#) of Faku area, eastern section of the northern margin of the North China Plate

Q—第四系;Mz—中生界;Pz—古生界;Wγ—五龙山杂岩;Gδc—高丽沟杂岩;T_1S—十间房超单元;T_2X—小房申岩体;T_2L—梨树沟单元;T_3H—花匠沟单元;J_2H—红土墙子单元;J_3S—石景山单元。Ⅰ—额尔古纳—兴安地块;Ⅱ—松嫩—张广才岭地块;Ⅲ—佳木斯—兴凯地块;Ⅳ—华北北缘增生带;Ⅴ—华北板块

Q—Quaternary; Mz—Mesozoic; Pz—Paleozoic; Wγ—Wulongshan intrusions; Gδc—Gaoligou intrusions; T_1S— Shijianfang intrusions; T_2X—Xiaofangshen intrusions; T_2L—Lishugou intrusions; T_3H—Huajianggou intrusions; J_2H— Hongtuqiangzi intrusions; J_3S—Shijingshan intrusions. Ⅰ—Erguna—Hinggan block; Ⅱ— Songhua River—Nenjiang River—Zhangguangcai Mountains block; Ⅲ—Kiamusze—Xingkai block; Ⅳ— accretionary zones of the north margin of the North China Plate; Ⅴ— the North China Plate

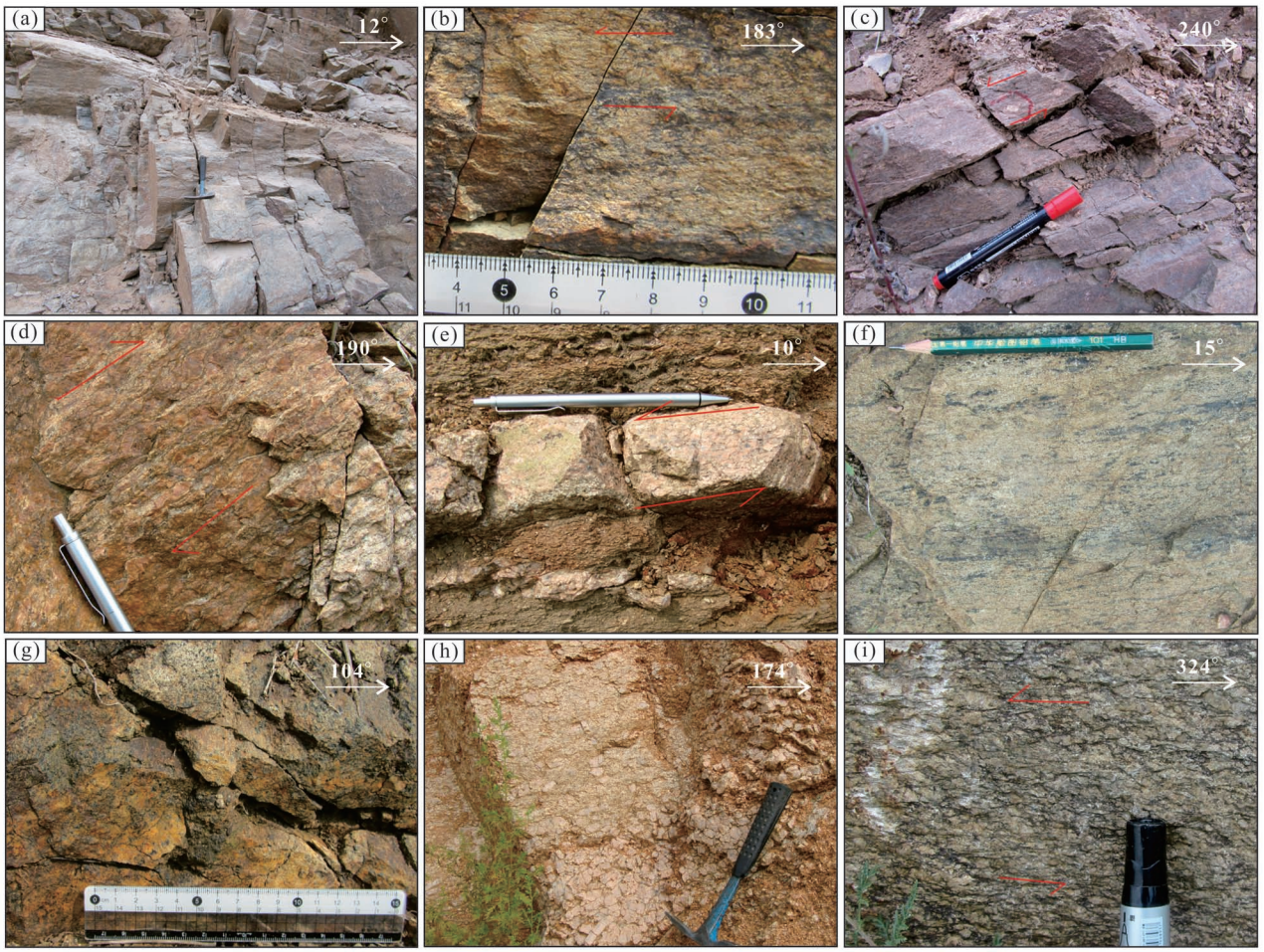


图 2 华北板块北缘东段法库地区侵入岩宏观变形特征

Fig. 2 Deformation features of intrusive rocks in Faku sheer zone, the eastern section of the northern margin of the North China Plate

(a) 五龙山杂岩中窗棂构造;(b) 五龙山杂岩糜棱岩化强烈,*XZ* 面上长石 σ 旋转碎斑指示上盘向北运动;(c) 高丽沟杂岩糜棱岩化强烈,*XZ* 面上长石书斜构造指示上盘向北运动;(d) 十间房超单元变形较强烈,*XZ* 面上钾长石 σ 旋转碎斑指示上盘南运动;(e) 十间房超单元脉体 *XZ* 面上两侧向中部变形逐渐减弱,边部长石 σ 旋转碎斑指示上盘向南运动;(f) 小房申岩体 *XY* 面上角闪石定向排列形成线理;(g) 小房申岩体 *YZ* 面上角闪石呈粒状;(h) 梨树沟单元矿物无韧性变形,矿物分布具有定向特征,构成原生线理;(i) 花匠沟单元岩石变形较弱,长石旋转碎斑指示上盘向南运动

(a) Rodding sturcture of Wulongshan intrusions; (b) intense mylonitization of Wulongshan intrusions, feldspar σ rotational augens in *XZ* side indicates northward movement of the upper plate; (c) intense mylonitization Gaoligou intrusions, feldspar domino boudins in *XZ* sideindicates northward movement of the upper plate; (d) strong deformation of Shijianfang intrusions, K-feldspar σ rotational augens in *XZ* side indicates southward movement of the upper plate; (e) deformation of Shijianfang quartz vein wear off from both sides to the middle, feldspar σ rotational augens indicates southward movement of the upper plate; (f) hornblendes in Xiaofangshen intrusions orientation arrangement; (g) hornblendes are grainy in *YZ* side of Xiaofangshen intrusions; (h) minerals in Lishugou intrusions show no ductile deformation, but K- feldspars form primary lineations; (i) deformation of Huajianggou intrusions is weak, feldspar rotational augens indicates southward movement of the upper plate

流面构造(图 2h),流面产状与上覆十间房超单元面理基本一致,表明此时矿物结晶处于韧性剪切作用之下。

花匠沟单元(T_3H):岩性以黑云斜长花岗岩为主。侵入十间房超单元,变形较弱,石英呈粒状、拉长的条状或不规则状,长石呈粒状,粒径一般约为 10 mm,黑云母沿面理定向分布。线理倾伏向总体上近东西,倾角平缓。S—C 组构、长石 σ 旋转碎斑等指示上盘向南东运动(图 2i),与区域韧性剪切方向明显不同。

总体看来,法库韧性剪切带变形具有阶段性特征,中二叠世韧性剪切带发生上盘向北的剪切变形,

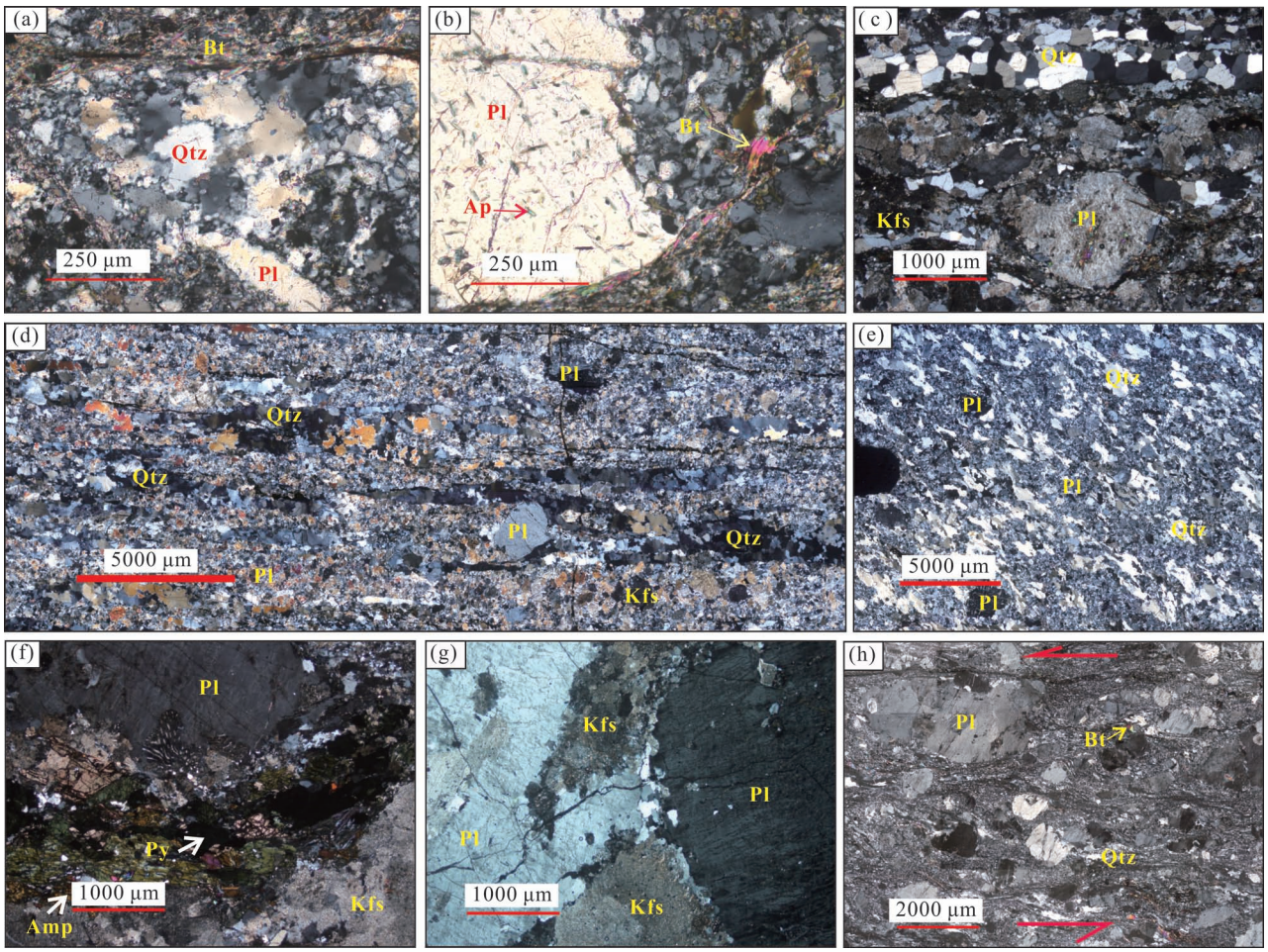


图 3 华北板块北缘东段法库地区变形侵入岩显微构造照片(CPL)

Fig. 3 Microstructure photos of deformed intrusive rocks from Faku area, the eastern section of the northern margin of the North China Plate(CPL)

五龙山杂岩:(a)—石英颗粒边界迁移重结晶;(b)—长石膨凸重结晶形成核幔构造。高丽沟杂岩:(c)—石英颗粒具有稳定三联点结构,斜长石发生膨凸重结晶。十间房超单元:(d)—*XZ* 面上石英拔丝拉长,发生颗粒边界迁移重结晶;(e)—YZ 面上石英集合体呈不规则的椭圆状,亚颗粒具有一定的定向性。小房申岩体:(f)—斜长石发育有蠕英结构。梨树沟单元:(g)—钾长石发育卡式双晶。花匠沟单元:(h)—石英重结晶方式有膨凸重结晶、亚颗粒旋转重结晶;长石以脆性变形为主,σ 旋转碎斑发育;云母定向分布,云母鱼构造发育

Wulongshan intrusions: (a)—Subgrain rotation recrystallisation(SGR) of quartz grains; (b)—Bulging recrystallisation (BLG) and core and mantle structure of plagioclase; Gaoligou intrusions: (c)—Stable triple point structure of quartz grains; Shijianfang superunit: (d)—Quartz grains wiredrawing elongates, and its grain boundary migration recrystallisation(GBM) in XZ side; (e)—The quartz aggregate is irregularly oval in shape, and subgrains weakly directional distribution in *YZ* side. Xiaofangshen intrusions: (f)—Myrmekitic texture of plagioclase. Lishugou intrusions: (g)—Carlsbad twin of K-feldspar. Huajianggou intrusions: (h)—BLG and SGR of quartz grains; Brittle deformation and σ rotational augens of feldspar; Oriented distribution and mica Fish structure of Mica

早—中三叠世期间剪切方向由上盘向北剪切逐渐转变为上盘向南剪切,十间房超单元记录了这一过程。晚三叠世研究区处于南东—北西方向挤压作用之下,暗示此时太平洋构造域演化在研究区内占主导地位。

2.2　显微构造特征

五龙山杂岩(Wγ):矿物强烈的细粒化,粒径一般在 50 μm 左右,少量长石碎斑粒径>500 μm。石英重结晶方式以颗粒边界迁移为主(图 3a),重结晶新颗粒粒径一般大于 100 μm。长石发生波状消光,部分发生扭折,膨凸重结晶作用形成核幔构造(图 3b),偶见 δ 旋转碎斑系。黑云母呈细小片状零散分布于基质中,或者沿矿物边缘及先存裂隙定向分布,局部可见云母鱼构造。长石 δ 旋转碎斑系、云母鱼等指示上盘向北剪切。显微构造总体显示出中级糜棱岩(Medium-Grade Mylonites)的特征,岩石变形

温度条件约为 500~650 ℃(Trouw et al., 2009)。

高丽沟杂岩:石英多呈条带状、树枝状,石英条带中亚颗粒或重结晶新颗粒粒径一般大于 200 μm,具有稳定的三联点结构;斜长石发生膨凸重结晶作用,偶见长石旋转碎斑(图 3c),指示上盘向北运动。显微构造特征显示该单元总体具有高级糜棱岩(High-Grade Mylonites)特征(Trouw et al., 2009)。

十间房超单元:*XZ* 面上,石英呈拉长的条带状,重结晶方式以颗粒边界迁移重结晶为主,兼有亚颗粒旋转重结晶,石英亚颗粒(及新颗粒)粒径一般为 150~200 μm;斜长石多呈微细粒状,偶有浑圆的碎斑,碎斑边缘可见膨凸重结晶,发育晶内微破裂;云母集中分布于石英条带两侧,解理面多垂直与 *XZ* 面(图 3d)。*YZ* 面上,矿物动态重结晶方式与 *XZ* 面上的一致,石英集合体呈不规则的椭圆状,亚颗粒具有一定的定向性;长石碎斑边缘棱角分明;云母解理面多垂直于 *YZ* 面,难以观察到(图 3e)。显微构造显示该单元总体具有中级糜棱岩(Medium-Grade Mylonites)的特征,变形温度范围约约为 500~650℃(Trouw et al., 2009)。

小房申岩体:薄片中矿物颗粒一般较大(>1000 μm),斜长石发育有蠕英结构(图 3f),石英含量较少且分布不均,颗粒之间具有稳定的三联点结构,粒径一般大于 200 μm。钾长石泥化现象普遍,发育卡式双晶,部分斜长石发交代作用。总体显示出岩石变形处于较高温度条件。

梨树沟单元:镜下表现为全晶质结构,钾长石呈自形状,粒径巨大,超过整个视域,卡式双晶发育,具有一定泥化现象。斜长石含量较少,发育有后期形成的穿晶破裂(图 3g)。

花匠沟单元:石英重结晶方式以膨凸重结晶及亚颗粒旋转重结晶为主,S—C 组构发育,长石颗粒较大,粒径 300~2000 μm,脆性变形为主,σ 旋转碎斑发育,云母定向分布,发育云母鱼构造(图 3h)。石英 S—C 组构、长石 σ 旋转碎斑、云母鱼等显微构造均指示上盘向南东运动。显微构造显示出低级糜棱岩(Low-grade mylonites)特征,岩石变形处于中低温(约 250~550℃)环境。

2.3 石英 *c* 轴组构分析

石英有多种滑移系,常见的有底面<a>、菱面<a>、柱面<a>和柱面<c>,构造岩在不同的变形条件下,石英滑移系不同,因而产生不同的石英晶格优选(LPO)。底面<a>滑移形成温度约为 350~550℃、柱面<a>滑移形成温度约为 450~600℃、柱面<c>滑移形成温度约为 550~700℃(Toy, 2008;夏浩然等,2011;张睢易,2017)、菱面<a>滑移形成温度约为 500℃(Law, 2014)。

采集法库韧性剪切带内侵入岩定向样品,沿平行于 *XZ* 面方向磨制薄片,利用电子背散射(EBSD)技术对薄片进行石英 *c* 轴组构分析。实验在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,分析方法、数据处理参考相关文献(刘俊来等,2008)。

为了揭示韧性剪切带发展不同阶段特征,选择位置相近、时代不同的样品(FK46、FK53、FK16)进行石英 *c* 轴组构对比。

FK46 样品来自于高丽沟杂岩,石英 *c* 轴组构表现为一个靠近 *Y*0 轴主点极密和一个靠近 *Z*0 轴次级点极密,靠近 *X*0 轴存在一个微弱点极密。*Y*0 轴极密由柱面<a>滑移完成,形成于中等温度条件(约 450~600℃);次级极密与底面<a>有关,形成于低温条件(约 350~550℃)。组构对称形式为单斜对称,主极密和次级极密指示左行了剪切作用,微弱极密反映了右行剪切作用。经产状恢复,左行对应上盘向北剪切,右行对应上盘向南剪切。组构特征表明高丽沟杂岩受到两次上盘向北的剪切作用和一次上盘向南的剪切作用。

FK53 样品来自于十间房超单元,石英 *c* 轴组构极密图上显示存在两个极密,相对于 *Y*0 方向对称分布,是菱面<a>滑移的结果,温度条件可能达到 500℃。组构单斜对称形式表明左行剪切作用,经产状恢复,指示上盘向北剪切。

FK16 样品来自于花匠沟单元,主要表现为两个位于 *Z*0 轴和 *Y*0 轴之间的点极密,反映的是低温变形条件为主,与菱面<a>滑移有关,温度条件约为 500℃。组构单斜对称形式指示左行剪切作用的存在,经产状恢复,指示上盘向南东方向剪切。

石英 *c* 轴组构表明样品变形总体处于中—中低温条件,变形温度自中二叠世至晚三叠世逐渐降低。剪切带上盘运动方向在晚三叠世以前为 S—N 向,自晚三叠世剪切方向变为 SE 向。

为深入了解同一阶段剪切带不同部位变形差异,选择 CD、EF 两个剖面进行观察。

CD 剖面上,FK1、FK28 表现为 *Y*0 轴极密,反映中温条件(450~600℃),与柱面<a>滑移有关;FK30 极密位于 *Y*0、*Z*0 轴之间,与菱面<a>滑移有关,反映的是中温变形条件(约 500℃)。组构均呈单斜对称形式,表明了剪切作用的存在,通过薄片副样恢复产

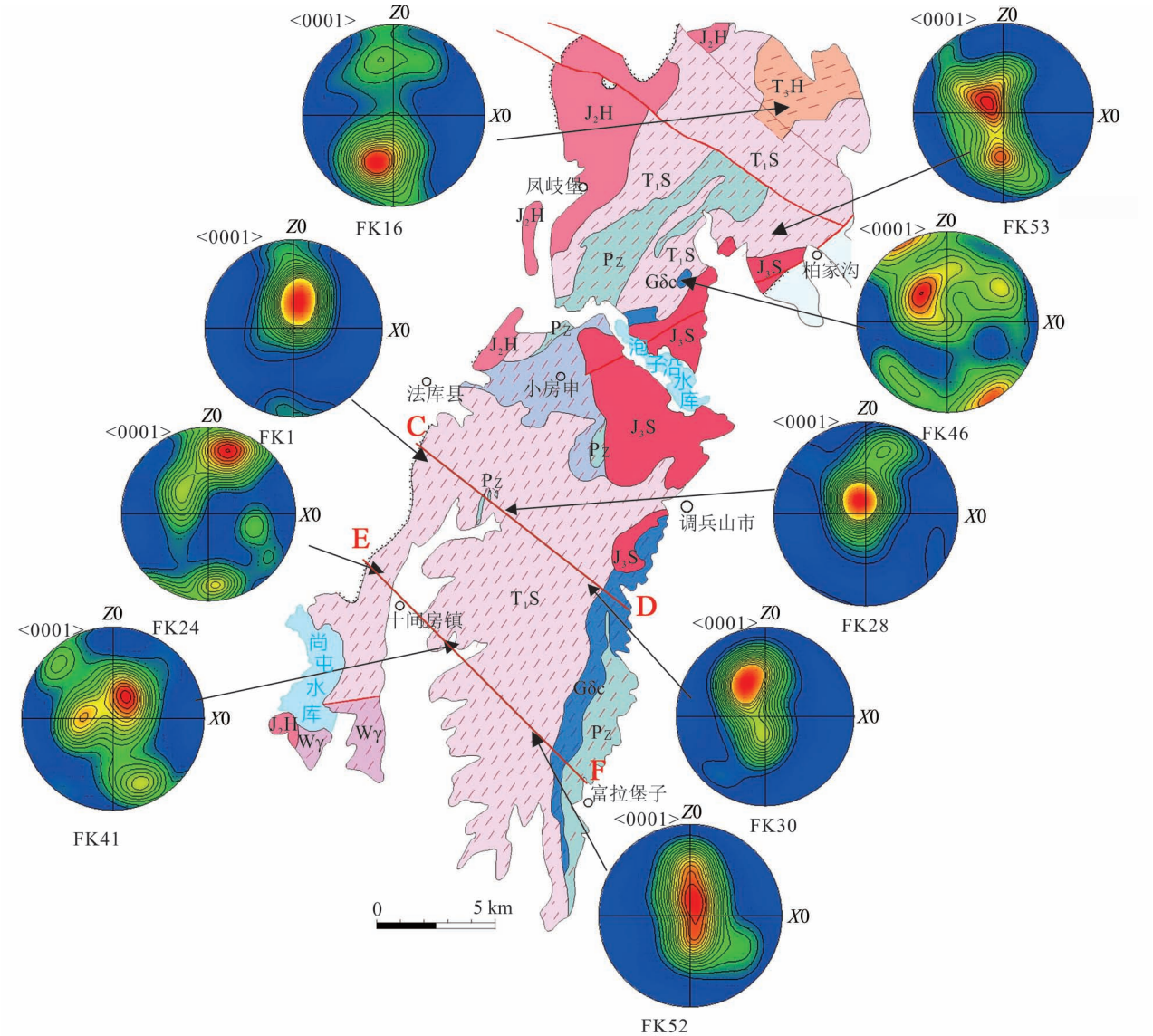


图 4 华北板块北缘法库剪切带不同部位石英 *c* 轴组构特征

Fig. 4 Quartz *c*-axis fabrics at different place of Faku ductile sheer zone, northern margin of the North China Plate

状,FK1、FK30 指示上盘向南剪切、FK28 指示上盘向北剪切。

EF 剖面上,FK24 以 *Z*0 轴极密为主,兼有 *Y*0 轴微弱极密,反映了低温条件(350~550℃)为主,以底面<a>滑移为主。FK41 样品以两个 *Y*0 轴上点极密为主,兼有靠近 *Z*0 轴的两个次级极密,主极密与柱面<a>滑移有关,反映中温条件(550~650℃),次级极密与底面<a>滑移有关,反映了低温条件(350~550℃)为主。FK52 极密处于 *Y*0 轴和 *Y*0 轴、*Z*0 之间,反映了中低温条件(350~600℃),与柱面<a>和菱面<a>滑移有关。通过薄片副样恢复产状,FK24、FK41 指示上盘向南剪切为主,FK52 指示上盘向北剪切。

石英 *c* 轴组构特征显示十间房超单元既存在上盘向南剪切又存在上盘向北剪切,表明不同时期的十间房超单元遭受了方向相反的两种韧性剪切作用。

3　锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年

3.1　采样及分析方法

本次工作在野外采集了 3 件同时期的同剪切侵入岩测年样品,为法库韧性剪切带演化提供年龄数据支撑,每件样品重量大于 5 kg。FK6-2 样品采自侵入高丽沟杂岩中的脉状十间房超单元(图 2e),岩

石变形处于上盘向南的剪切作用之下,且经历了剪切作用逐渐减弱直至消失的过程;FK46-2 采自于高丽沟杂岩(图 2c),代表了高丽沟杂岩的成岩时间。FK46-4 采自于高丽沟杂岩中的十间房单元侵入体。

实验在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室激光烧蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)微区分析实验室完成,激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司的 GeoLasPro 193 准分子固体进样系统,ICP-MS 为美国 Thermo Fisher 公司的 X Series 2 型四极杆等离子体质谱。测试激光束斑直径为 32 μm,频率为 6 Hz,采用氦气作为载气,氩气作为补偿气。采用美国国家标准参考物质 NIST SRM610 对仪器进行最佳化,并将其作为微量元素含量测定的外标。采用标准锆石 91500(Michael et al., 2004)作为定年外标,采用标准锆石 Mud Tank(Black et al., 1978)作为监控样品。在样品测试过程中每测定 5 个样品点测定两次标准锆石 91500。测试完成后,采用软件 ICP-MSDataCal(Liu Yongsheng et al., 2008)对测试数据进行后期处理,年龄计算和谐和图的绘制采用 Isoplot4.15 完成。

3.2 分析结果

FK6-2 样品锆石形状多呈四方锥状或长条状,粒径大于 100 μm,具有较明显的岩浆锆石韵律环带,锆石边部多具有较窄的变质边,在阴极发光(CL)照片上呈暗黑色,Th/U 值介于 0.107~0.810 之间,符合岩浆复合锆石特征。测试共分析 22 个点,核部及边部的年龄差异不大,锆石 $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 加权平均年龄为 244.4±3.0 Ma (MSWD = 1.9)。

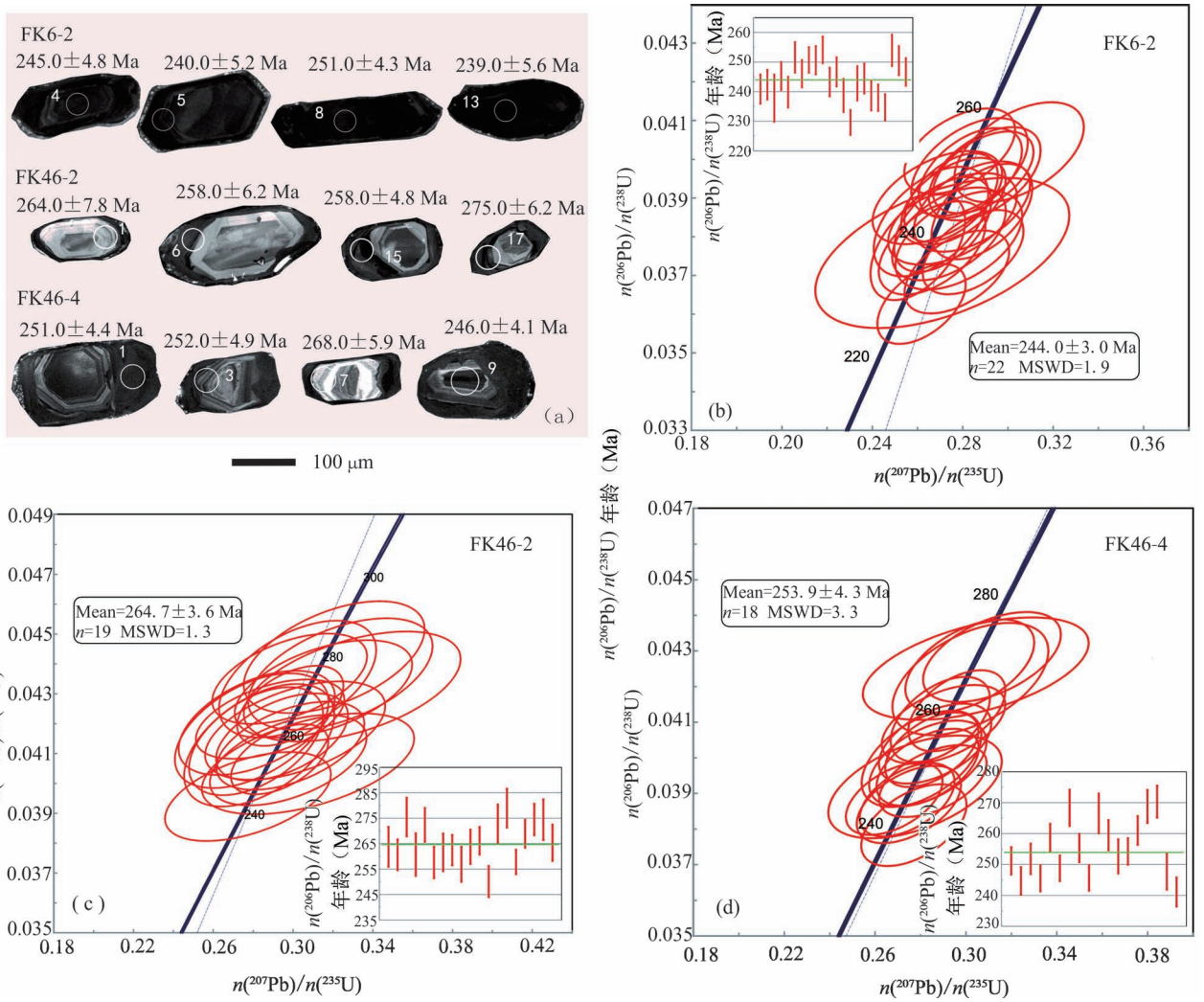


图 5 华北板块北缘法库地区侵入岩锆石 CL 照片及 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) image and zircon U-Pb diagrams of the intrusive rocks at Faku area, northern margin of the North China Plate

表 1 华北板块北缘法库地区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytical results of the intrusive rocks at Faku area, northern margin of the North China Plate

测点号	元素含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
样品 FK6-2																	
1	467.4	1118	14455	0.08	0.0514	0.0032	0.2739	0.0166	0.0381	0.0008	257	143	246	13.2	241	4.9	97
2	516.4	637	16444	0.04	0.0506	0.0027	0.2712	0.0142	0.0383	0.0008	220	122	244	11.3	242	5.0	99
3	23.82	128	654	0.20	0.0520	0.0074	0.2710	0.0371	0.0376	0.0013	287	296	243	29.6	238	8.0	97
4	508	4771	11110	0.43	0.0529	0.0035	0.2841	0.0170	0.0388	0.0008	324	155	254	13.4	245	4.8	96
5	387	2131	10604	0.20	0.0527	0.0036	0.2783	0.0185	0.0379	0.0008	317	156	249	14.7	240	5.2	96
6	1165	8790	27080	0.32	0.0511	0.0032	0.2830	0.0170	0.0398	0.0008	256	143	253	13.5	252	5.2	99
7	417	3569	9867	0.36	0.0510	0.0029	0.2759	0.0152	0.0389	0.0007	239	130	247	12.1	246	4.6	99
8	854	6359	19760	0.32	0.0525	0.0028	0.2891	0.0147	0.0397	0.0007	309	125	258	11.6	251	4.3	97
9	798	2263	23400	0.10	0.0515	0.0027	0.2834	0.0151	0.0396	0.0008	261	94	253	11.9	251	4.8	98
10	352.8	907	10261	0.09	0.0501	0.0030	0.2787	0.0162	0.0402	0.0007	198	139	250	12.8	254	4.5	98
11	279.9	912	8262	0.11	0.0515	0.0035	0.2755	0.0188	0.0385	0.0008	265	157	247	15.0	243	4.8	98
12	181.9	546	5312	0.10	0.0491	0.0035	0.2688	0.0189	0.0390	0.0008	150	159	242	15.1	247	4.9	97
13	782	2237	23903	0.09	0.0489	0.0025	0.2602	0.0138	0.0377	0.0009	143	122	235	11.1	239	5.6	98
14	592	1878	17227	0.11	0.0511	0.0027	0.2618	0.0129	0.0363	0.0007	243	122	236	10.4	230	4.2	97
15	473	1423	13059	0.11	0.0482	0.0032	0.2660	0.0167	0.0384	0.0009	109	148	240	13.4	243	5.8	98
16	509.5	751	14266	0.05	0.0521	0.0029	0.2885	0.0147	0.0386	0.0008	300	123	257	11.6	244	5.1	94
17	268	1425	6938	0.21	0.0494	0.0031	0.2665	0.0156	0.0377	0.0008	165	146	240	12.5	239	4.9	99
18	406	3152	9489	0.33	0.0527	0.0028	0.2846	0.0147	0.0376	0.0007	317	120	254	11.6	238	4.5	93
19	472.2	1102	14372	0.08	0.0523	0.0031	0.2774	0.0153	0.0371	0.0007	298	131	249	12.1	235	4.4	94
20	383.6	559	10832	0.05	0.0534	0.0035	0.3050	0.0189	0.0402	0.0009	346	146	270	14.7	254	5.3	93
21	189.9	582	5270	0.11	0.0522	0.0031	0.2898	0.0163	0.0396	0.0008	295	133	258	12.8	250	4.9	96
22	313	1813	8133	0.22	0.0507	0.0027	0.2749	0.0136	0.0390	0.0008	233	122	247	10.9	247	4.7	99
样品 FK46-2																	
1	25.7	254.3	480.3	0.53	0.0494	0.0058	0.2793	0.0254	0.0418	0.0013	165	256	250	20.2	264	7.8	94
2	56.7	561.5	1000.3	0.56	0.0527	0.0049	0.2987	0.0245	0.0413	0.0010	317	211	265	19.2	261	6.0	98
3	45.7	415.3	757.6	0.55	0.0519	0.0049	0.3238	0.0305	0.0437	0.0012	283	218	285	23.4	275	7.6	96
4	37.8	393.1	640.5	0.61	0.0511	0.0054	0.2831	0.0249	0.0413	0.0014	243	235	253	19.7	261	8.4	97
5	53.3	554.8	809.3	0.69	0.0521	0.0053	0.3153	0.0294	0.0432	0.0011	300	235	278	22.7	272	6.6	97
6	52.7	417.5	1174.4	0.36	0.0535	0.0052	0.2976	0.0260	0.0408	0.0010	350	216	265	20.3	258	6.2	97

测点号	元素含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
7	38.0	439.9	623.6	0.71	0.0491	0.0048	0.2815	0.0222	0.0414	0.0012	154	215	252	17.6	262	7.4	96
8	71.8	816.9	1289.2	0.63	0.0509	0.0039	0.2945	0.0218	0.0416	0.0010	235	206	262	17.1	262	6.0	99
9	30.7	321.9	549.8	0.59	0.0586	0.0080	0.3075	0.0352	0.0407	0.0011	550	300	272	27.3	257	6.9	94
10	40.5	389.3	603.2	0.65	0.0518	0.0055	0.3011	0.0298	0.0418	0.0011	276	243	267	23.3	264	6.7	98
11	65.3	760.6	1036.5	0.73	0.0492	0.0043	0.2885	0.0246	0.0422	0.0009	154	196	257	19.4	266	5.4	96
12	32.7	266.8	699.8	0.38	0.0518	0.0057	0.2774	0.0275	0.0396	0.0010	280	258	249	21.8	250	6.1	99
13	32.0	321.8	489.2	0.66	0.0551	0.0063	0.3297	0.0359	0.0432	0.0012	417	256	289	27.4	273	7.5	94
14	26.4	243.2	465.1	0.52	0.0514	0.0052	0.3207	0.0300	0.0442	0.0012	261	235	282	23.0	279	7.6	98
15	257.5	1852.2	5619.2	0.33	0.0505	0.0030	0.2933	0.0161	0.0408	0.0008	220	135	261	12.6	258	4.8	98
16	146.2	1654.4	2656.3	0.62	0.0494	0.0030	0.2986	0.0176	0.0426	0.0009	169	143	265	13.8	269	5.5	98
17	64.9	444.4	1326.8	0.33	0.0490	0.0042	0.2983	0.0256	0.0435	0.0010	150	193	265	20.1	275	6.2	96
18	42.1	409.6	765.5	0.54	0.0494	0.0047	0.3023	0.0260	0.0435	0.0013	169	207	268	20.3	274	8.0	97
19	38.8	331.5	723.4	0.46	0.0480	0.0051	0.2819	0.0259	0.0420	0.0012	98	233	252	20.5	265	7.1	94
样品 FK46-4																	
1	153.5	516.2	4200.8	0.12	0.0511	0.0029	0.2831	0.0149	0.0397	0.0007	256	125	253	11.8	251	4.4	99
2	149.7	319.6	4383.7	0.07	0.0511	0.0028	0.2749	0.0151	0.0387	0.0007	243	128	247	12.1	245	4.4	99
3	125.9	1539.8	2304.9	0.67	0.0520	0.0034	0.2832	0.0170	0.0398	0.0008	283	150	253	13.5	252	4.9	99
4	115.5	277.0	3433.1	0.08	0.0507	0.0025	0.2741	0.0138	0.0388	0.0007	228	115	246	11.0	246	4.2	99
5	117.0	1103.6	2293.0	0.48	0.0507	0.0031	0.2901	0.0179	0.0409	0.0007	228	143	259	14.1	259	4.5	99
6	160.3	604.4	4350.5	0.14	0.0520	0.0029	0.2855	0.0156	0.0393	0.0007	287	128	255	12.3	249	4.1	97
7	76.3	885.9	1248.5	0.71	0.0520	0.0056	0.3043	0.0328	0.0425	0.0009	287	248	270	25.5	268	5.9	99
8	165.9	1896.6	3009.8	0.63	0.0510	0.0030	0.2864	0.0163	0.0404	0.0007	243	137	256	12.9	255	4.6	99
9	155.2	1704.0	3122.1	0.55	0.0496	0.0027	0.2684	0.0140	0.0388	0.0007	176	121	241	11.2	246	4.1	98
10	54.6	651.8	871.5	0.75	0.0521	0.0044	0.3020	0.0227	0.0422	0.0010	287	197	268	17.7	267	6.4	99
11	224.4	2349.9	4453.5	0.53	0.0500	0.0025	0.2887	0.0144	0.0411	0.0008	198	117	258	11.4	260	4.9	99
12	86.3	382.2	2417.1	0.16	0.0500	0.0031	0.2805	0.0174	0.0400	0.0009	195	144	251	13.8	253	5.5	99
13	133.1	487.1	3741.3	0.13	0.0502	0.0023	0.2850	0.0135	0.0402	0.0007	211	105	255	10.7	254	4.3	99
14	145.2	385.5	4285.5	0.09	0.0510	0.0024	0.2960	0.0141	0.0413	0.0008	239	109	263	11.0	261	4.6	99
15	141.3	1331.5	3041.7	0.44	0.0510	0.0033	0.3017	0.0187	0.0426	0.0009	239	150	268	14.6	269	5.3	99
16	122.5	1176.7	2606.0	0.45	0.0525	0.0034	0.3115	0.0200	0.0428	0.0008	306	153	275	15.5	270	5.2	98
17	57.4	1054.3	687.2	1.53	0.0512	0.0050	0.2776	0.0252	0.0392	0.0010	250	226	249	20.0	248	5.9	99
18	160.1	2308.4	2886.9	0.80	0.0525	0.0030	0.2771	0.0153	0.0381	0.0008	306	130	248	12.2	241	4.7	97

FK46-2 样品锆石形状以四方锥状为主,粒径大于 100 μm,多具有较清晰韵律环带,个别锆石环带不清晰,Th/U 值范围在 0.196~0.756 之间,总体符合岩浆锆石的特征。测试共分析了 19 个点,核部及边部的年龄差异不大,锆石 $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 加权平均年龄为 264.7±3.6 Ma(MSWD = 1.3)。

FK46-4 样品锆石颗粒呈四方锥状,粒径大于 100 μm,具有较明显的岩浆锆石韵律环带。Th/U 值变化范围为 0.076~1.534,总体符合岩浆锆石特点。测试共分析了 18 个点,核部及边部的年龄差异不大,锆石 $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 加权平均年龄为 253.9±4.3 Ma(MSWD = 3.3)。

4　讨论

前人研究认为华北板块北缘在早二叠世至晚二叠世期间处于古亚洲洋的俯冲作用下,俯冲板片断离及造山后伸展发生在晚二叠世(262~255 Ma),古亚洲洋构造域完成于 250~228 Ma(彭玉鲸等,2012;赵娟等,2012;Cao Huahua et al., 2013)。

法库韧性剪切带位于华北板块北缘东段(辽北地区),剪切带内的同构造侵入岩在剪切作用下发生糜棱岩化,石英发生颗粒边界迁移重结晶,斜长石普遍发生膨凸重结晶,石英 *c* 轴组构特征均表现为靠近 Y0 轴点集密为主,表明剪切带变形总体处于中温条件(550~650℃),属中—下地壳层次。这与前人认为的法库韧性剪切带形成于绿片岩相条件、形成温度略低于 400℃有所不同(杨晓波等,1996;郝永利等,1996;张晓晖等,2004)。

同构造侵入岩中矿物变形(长石 σ 旋转碎斑、石英 S—C 组构、长石书斜构造等)、显微构造(长石 δ 和 σ 旋转碎斑系、石英 S—C 组构、云母鱼等)以及石英 *c* 轴组构单斜对称形式表明五龙山杂岩、高丽沟杂岩(264.7±3.6 Ma)侵入过程处于上盘向北的剪切作用下,早期十间房超单元(253.9±4.3 Ma)侵入高丽沟杂岩并且与高丽沟杂岩同遭受上盘向北的剪切作用,晚期十间房超单元(244.0±3.0 Ma)岩石受到上盘向南剪切作用,且岩石边部变形强,至中部逐渐消失,反映了剪切作用减弱至消失。

前人对该区开展岩石地球化学分析结果表明,十间房超单元由两部分组成,一部分为辉长岩~二长岩,侵位年龄约 260 Ma,岩石地球化学特征表现为大离子亲石元素和轻稀土强烈富集、高场强元素亏损、$[n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)]_i$ = 0.70549~0.7054、$\varepsilon_{Nd}(t)$ = +2.72~1.82、锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ = +3.4~+7.1,岩石来源于俯冲相关的岩石圈地幔的高度部分熔融;另一部分为长英质,侵位年龄约 250 Ma,岩石地球化学特征表现为轻稀土富集、无 Eu 异常、高 Ba、Sr、Ti、高场强元素富集、I_{Sr} = 0.7043~0.7062、$\varepsilon_{Nd}(t)$ = +2.28~0.55、锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ = +3.6~+6.6,岩石来源于年轻的玄武岩底板及古老下地壳组成的原岩的部分熔融(张晓晖等,2005; Zhang Xiaohui et al., 2010)。小房申岩体(241±6 Ma)岩石地球化学特征表现为大离子亲石元素,轻稀土元素强烈富集,Eu 轻亏损,高场强元素明显亏损,$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$ = 0.7053~0.7055,$\varepsilon_{Nd}(t)$ = +0.40~+0.68,锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ = +0.50~+7.4,岩石来源于俯冲相关的岩石圈地幔交代部分熔融(Zhang Xiaohui et al., 2008)。十间房超单元及小房申岩体中幔源组成部分暗示了此时构造过程是壳、幔共同作用的结果。

综合区域地质背景、同构造侵入岩变形特征以及前人研究成果可知,法库韧性剪切带是古亚洲洋板块演化在辽北地区中—下地壳层次的响应;剪切带上盘向北运动应该是古亚洲洋板块俯冲、微陆块碰撞的结果,剪切方向转变为上盘向南运动且剪切作用逐渐减弱至消失是因为构造体制由碰撞转变为持续时间较短的碰撞后伸展,而 244.0±3.0 Ma 接近碰撞后伸展的结束时间,这较前人的研究(262~255 Ma)略晚;构造体制转变是地壳底部俯冲板片断离导致的;晚三叠世花匠沟单元剪切带运动方式为上盘向南东方向运动,岩石变形特征也与其他变形侵入岩不同,说明此时该区剪切作用可能处于另一构造应力场之下,与古亚洲洋演化无关。

5　结论

(1)法库韧性剪切带在中二叠世—早三叠世期间受古亚洲洋板块俯冲华北板块控制,是 NNE—SSW 方向的挤压作用在中下地壳层次的产物。中二叠世韧性剪切带上盘向北剪切,早三叠世逐渐转变为上盘向南剪切。韧性剪切带变形特征反映了古亚洲洋板块演化过程。

(2)中—晚二叠世(264.7~253.9 Ma)华北板块北缘东段(辽北地区)处于古亚洲洋板块俯冲作用之下,晚二叠世至早三叠世(253.9~244.0 Ma)构造体制转为碰撞后伸展,244.0±3.0 Ma 接近碰撞后伸展的结束时间。

(3)晚二叠世至早三叠世(253.9~244.0 Ma)构造运动形式转变并逐渐结束过程中有岩石圈地幔加入,所以该构造过程是壳幔共同作用的结果。结

合区域构造背景推测是古亚洲洋板块的俯冲板片断离、重力失衡的结果,这标志着辽北地区古亚洲洋构造域演化结束。

注 释 / Note

❶ 辽宁省地质矿产局区调队. 1996. 法库县、五台子、大明镇三幅 1∶5 万区域地质调查报告.

Regional geological survey team of Liaoning Geology and Mineral Resources Bureau. 1996#. 1∶50000 Regional Geological Survey Report of Faku County, Wu Taizi and Daming town.

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)

曹花花, 许文良, 裴福萍, 郭鹏远, 王枫. 2012. 华北板块北缘东段二叠纪的构造属性:来自火山岩锆石 U-Pb 年代学与地球化学的制约. 岩石学报, 28(9): 2733~2750.

崔玉良, 渠洪杰, 陈英富, 王森. 2019. 华北克拉通北缘与陆缘弧相关的早二叠世流纹岩——锆石 U-Pb 定年及地球化学证据. 地质论评, 65(6): 1299~1315.

郝永利, 黄志安, 王福君. 1996. 法库地区十间房超单元花岗岩岩石成因及侵位机制探讨. 辽宁地质, (4): 274~282.

李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. 地质评论, 44(4): 339~347.

李锦轶. 2004. 中国大陆地壳"镶嵌与叠覆"的结构特征及其演化. 地质通报, 23(9~10): 986~1004.

李双林, 欧阳自远. 1998. 兴蒙造山带及邻区的构造格局与构造演化. 海洋地质与第四纪地质, 18(3): 45~54.

葛肖虹, 马文璞, 刘俊来, 任收麦, 刘永江, 袁四化, 王敏沛. 2009. 对中国大陆构造格架的讨论. 中国地质, 36(5): 949~964.

刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 宋志杰. 2008. 岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用. 地质通报, 27(10): 62~69.

吕洪波,冯雪东,王俊,朱晓青,董晓朋,张海春,章雨旭. 2018. 狼山发现蛇绿混杂岩——华北克拉通与中亚造山带碰撞边界的关键证据. 地质论评,64(4):777~805.

牛树银, 孙爱群, 张建珍, 李红阳, 叶东虎, 王金琐, 罗殿文. 1996. 华北地台北缘中段构造演化及成矿控矿作用. 石家庄经济学院学报, 19(3~4): 236~246.

潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 张克信, 尹福光, 郝国杰, 骆满生, 任飞, 袁四化. 2016. 中国大地构造阶段划分和演化. 地学前缘, 23(6): 1~23.

彭玉鲸, 齐成栋, 周晓东, 卢兴波, 董红辰, 李壮. 2012. 吉黑复合造山带古亚洲洋向滨太平洋构造域转换: 时间标志与全球构造的联系. 地质与资源, 21(3): 261~265.

任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 1999. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用. 地学前缘, 6(3): 85~93.

邵济安, 牟保磊, 何国琦, 张履桥. 1997. 华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用. 中国科学(D 辑), 27(5): 390~394.

邵济安, 田伟, 唐克东, 周新华. 2018. 初论微陆块在中亚造山带演化中的作用: 以锡林浩特微陆块为例. 地学前缘, 25(4): 1~10.

唐克东. 1989. 中朝陆台北侧褶皱带构造发展的几个问题. 现代地质, 3(2): 195~204.

王金芳, 李英杰, 李红阳, 董培培. 2020. 古亚洲洋晚石炭世俯冲作用: 梅劳特乌拉蛇绿岩中扎嘎音高镁安山岩证据. 地质论评, 66(2): 289~306.

王瑜. 1996. 晚古生代末—中生代内蒙古—燕山地区造山过程中的岩浆热事件与构造演化. 现代地质, 10(1): 66~75.

汪相. 2018. 白云鄂博超大型稀土—铌—铁矿床的 成矿时代及成因探析 ——兼论 P—T 之交生物群灭绝事件和"阿蒙兴造山运动". 地质论评,64(2):299~345.

吴福元, 叶茂, 张世红. 1995. 中国满洲里—绥芬河地学断面域的地球动力学模型. 地球科学: 中国地质大学学报, 20(5): 535~539.

夏浩然, 刘俊来. 2011. 石英结晶学优选与应用. 地质通报, 30(1): 58~70.

谢才富. 2002. 同构造花岗岩的一种显微构造标记. 矿石矿物学杂志, 21(2): 179~185.

杨晓波, 高恩忆. 1996. 法库地区大型韧性剪切带特征及成因机制. 辽宁地质, 2: 109~117.

张进江. 1999. 大型走滑带内同构造花岗岩的判别标志. 地质科技情报, 18(4): 23~26.

张雎易. 2017. 中部地壳应变局部化: 金州拆离断层带石英结晶学组构约束. 硕士学位论文. 导师:刘俊来. 北京:中国地质大学.

张晓晖, 宿文姬, 王辉. 2005. 辽北法库构造岩系的锆石 SHRIMP 年代学研究与华北地台北缘边界. 岩石学报, 21(1): 135~142.

张晓晖, 王辉, 李铁胜. 2004. 辽北法库构造岩系的$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学研究及地质意义. 中国科学(D 辑), 34(6): 504~513.

张兴洲, 周建波, 迟效国, 王成文, 胡大千. 2008. 东北地区晚古生代构造——沉积特征与油气资源. 吉林大学学报(地球科学版), 38(5): 719~725.

赵娟, 彭玉鲸, 丁明广, 刘大业, 张宁, 杨传. 2012. 吉辽边界梅河口—开原地段晚海西—早印支期岩浆旋回及构造意义. 地质与资源, 21(4): 371~375.

Black L P, Gulson B L. 1978. The age of the mud tank carbonatite, strangways range, northern territory. BMR Journal of Australian Geology and Geophysics, 3 (3): 227~232.

Cao Huahua, Xu Wenliang, Pei Fuping, Guo Pengyuan, Wang Feng. 2012&. Permian tectonic evolution of the eastern section of the northern margin of the North China Plate: Constraints from zircon U-Pb geochronology of the volcanic rochs. Acta Petrologica Sinica, 28(9): 2733 ~ 2750.

Cao Huahua, Xu Wenliang, Pei Fuping, Wang Zhiwei. 2013. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic—Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block. Lithos, 170: 191~207.

Cui Yuliang, Qu Hongjie, Chen Yingfu, Wang Sen. 2019&. Early Permian rhyolite related to the continental marginal arc on the northern margin of the North China craton——evidence of zircon U-Pb dating and geochemical characteristics. Geological Review, 65(6): 1299~1314.

Ge Xiaohong, Ma Wenpu, Liu Junlai, Ren Shoumai, Liu Yongjiang, Yuan Sihua, Wang Minpei. 2009&. Discussion on the tectonic framework of the Chinese mainland. Geology in China, 36(5): 949~964.

Hao Yongli, Huang Zhian, Wang Fujun. 1996#. Discussion on the genesis and emplaced mechanism of the Shijianfang granite in Faku area. Liaoning Geology, (4): 274~282.

Jia Dacheng, Hu Ruizhong, Lu Yan, Qiu Xuelin. 2004. Collision belt between the Khanka block and the North China block in the Yanbian region, Northeast China. Journal of Asian Earth Sciences, 23 (2): 211~219.

Law R D. 2014. Deformation thermometry based on quartz *c*-axis fabrics

and recrystallization microstructures: A review. Journal of Structural Geology, 66: 129~161.

Li Jinyi. 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas. Geological Review, 44(4): 339~347.

Li Jinyi. 2004#. Structural characteristics and evolution of "Mosaic and overlapping" of China continental crust. Geological Bulletin of China, 23(9~10): 986~1004.

Li Jinyi. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. Journal of Asian Earth Sciences, 26 (3~4): 207~224.

Li Shuanglin, Ouyang Zhiyuan. 1998 #. Tectonic framework and evolution of Xing'anling—Monglian orogenic belt (XMOB) and its adjacent region. Marine Geology & Quaternary Geology, 18(3): 45~54.

Liu Junlai, Cao Shuyun, Zou Yunxin, Song Zhijie. 2008&. EBSD analysis of rock fabrics and its application. Geological Bulletin of China, 27(10): 1638~1645.

Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Detlef Günther, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 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.

Lin Wei, Faure W, Nomade S, Shang Qinghua, Renne P R. 2008. Permian—Triassic amalgamation of Asia: Insights from Northeast China sutures and their place in the final collision of North China and Siberia. Comptes Rendus Geoscience, 340 (2~3): 190~201.

LÜ Hongbo, Feng Xuedong, Wang Jun, Zhu Xiaoqing, Dong Xiaopeng, Zhang Haichun, Zhang Yuxu. 2018&. Ophiolitic mélanges found in Mount Langshan as the crucial evidence of collisional margin between North China Craton and Central Asian Orogenic Belt. Geological Review, 64(4): 777~805.

Michael W, John M H, William H P, Paul J S. 2004. Further characterisation of the 91500 zircon crystal. Geostandards and Geoanalytical Research, 28 (1): 9~39.

Niu Shuyin, Sun Aiqun, Zhang Jianzhen, Li Hongyang, Ye Donghu, Wang Jinsuo, Luo Dianwen. 1996#. The struetural evolution and metallization in central part of north margin, North China Platform. Journal of Shijiazhuang University of Economics, 19(3~4): 236~246.

Pan Guitang, Lu Songnian, Xiao Qinghui, Zhang Kexin, Yin Fuguang, Hao Guojie, Luo Mansheng, Ren Fei, Yuan Sihua. 2016&. Division of tectonic stages and tectonic evolution in China. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences (Beijing); Peking University), 23(6): 1~23

Peng Yujing, Qi Chengdong, Zhou Xiaodong, Lu Xingbo, Dong Hongchen, Li Zhuang. 2012&. Transition from Paleo-Asian ocean domain to Circum-Pacific ocean domain for the Jihei composite orogenic belt: Time mark and relationship to global tectonics. Geology and Resources, 21(3): 261~265.

Ren Jishun, Niu Baogui, Liu Zhigang. 1999 #. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing. Earth Science Frontiers, 6(3): 85~93.

Shao Ji'an, Mou Baolei, He Guoqi, Zhang Lvqiao. 1997#. Geological processes in the tectonic superposition process between paleoasian oceanic tectonic domain and palaeo-Pacific tectonic domain at the northern part of North China. Science in China(series D), 27(5): 390~394.

Shao Ji'an, Tian Wei, Tang Kedong, Zhou Xinhua. 2018&. Preliminary discussion on the role of microcontinental blocks in the evolution of the Central Asian orogenic belt: taking the Xilinhaote microcontinental block as an example. Earth Science Frontiers, 25 (4): 1~10.

Tang Kedong. 1989#. Several problems on tectonic development of the fold belts in the north margin of Sino—Korean platform. Geoscience, 3(2): 195~204.

Toy V G, Prior D J, Norris R J. 2008. Quartz fabrics in the Alpine Fault mylonites: Influence of pre-existing preferred orientations on fabric development during progressive uplift. Journal of Structural Geology, 30 (5): 602~621.

Trouw R A J, Passchier C W, Wiersma D J. 2009. Atlas of Mylonites and Related Rocks. Berlin: Springer.

Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2020&. Late Carboniferous intraoceanic subduction of the Paleo- Asian Ocean: New evidences from the Zagayin high- Mg andesite in the Meilaotewula SSZ ophiolite. Geological Review, 66(2): 289~306.

Wang Xiang. 2018&. Analysis on the oreforming time and genesis of the Bayan Obo REE—Nb—Fe Deposit: With a discussion on the mass extinction at the P—T boundary and "AMH Orogeny". Geological Review, 64(2): 299~345.

Wang Yu. 1996#. Magmatic thermal events and tectonic evolution of orogenic processes in Inner Mongolia—Yanshan orogenic belt during end of late Paleozoic—Mesozoic. Geoscience, 10(1): 66~75.

Wu Fuyuan, Ye Mao, Zhang Shihong. 1995#. Geodynamic model of the Manzhouli—Suifenhe geoscience transect. Earth Science—— Journal of China University of Geosciences, 20(5): 535~539.

Xia Haoran, Liu Junlai. 2011&. The crystallographic preferred orientation of quartz and its applications. Geological Bulletin of China, 30(1): 58~70.

Xiao Wenjiao, Brian F W, Hao Jie, Zhai Mingguo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. Tectonics, 22 (6): 1~20.

Xie Caifu. 2002&. A microstructure marker of syntectonic granitoids. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(2): 179~185.

Yang Xiaobo, Gao Enyi. 1996#. Characteristics and genetic mechanism of large ductile shear zone in Faku area. Liaoning Geology, 2: 109~117.

Yu Qian, Ge Wenchun, Yang Hao. 2014. Petrogenesis of late Paleozoic volcanic rocks from the Daheshen Formation in central Jilin Province, NE China, and its tectonic implications: Constraints from geochronology, geochemistry and Sr—Nd—Hf isotopes. Lithos, 192: 116~131.

Yu Jiejiang, Wang Feng, Xu Wenliang, Gao Fuhong, Pei Fuping. 2012. Early Jurassic mafic magmatism in the Lesser Xing'an—Zhangguangcai Range, NE China, and its tectonic implications: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry. Lithos, 142~143: 256~266.

Zhang Jinjiang. 1999#. Indicators for syntectonic granites in large-scale strike-slip zone. Geological Science and Technology Information, 18 (4): 23~26.

Zhang Juyi. 2017&. Strain localization of central crust: Quartz crystal fabric constraint in Jinzhou detachment fault zone (Master), China University of Geosciences(Beijing).

Zhang Xiaohui, Wang Hui, Li Tiesheng. 2004. $^{40}Ar/^{39}Ar$ chronology and geological significance of Faku tectonite in northern Liaoning province. Science in China(series D), 34(6): 504~513.

Zhang Xiaohui, Su Wenji, Wang Hui. 2005. Zircon shrimp geochronology of the Faku tectonites in the northern Liaoning province: Implications for the northern boundary of the North China Craton. Acta Petrolocica Sinica, 21(1): 135~142.

Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Simon A W, Yang Yueheng. 2010. Late Permian to Early Triassic mafic to felsic intrusive rocks from North Liaoning. Lithos, 117: 283~306.

Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Zhai Mingguo, Simon A W. 2008. Geochemistry of Middle Triassic gabbros from northern Liaoning, North China: origin and tectonic implications. Geological Magazine, 146 (4): 540~551.

Zhang Xingzhou, Zhou Jianbo, Chi Xiaoguo, Wang Chengwen, Hu Daqian. 2008&. Late paleozoic tectonic—sedimentation and petroleum resources in northeastern China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 38(5): 719~725.

Zhao Juan, Peng Yujing, Ding Mingguang, Liu Daye, Zhang Ning, Yang Chuan. 2012&. Late Hercynian—Early indosinian magmatic cycles in Meihekou— Kaiyuan between Jilin and Liaoning province: tectonic implication. Geology and Resources, 21(4): 371~375.

Deformation and regional tectonic significance of Faku ductile shear zone in northern Liaoning Province

WANG Lei[1,2,3], LIU Junlai[1], TENG Chao[4], CHANG Yuqiao[5]

1) *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources*, *China University of Geosciences*, *Beijing*, 100083;

2) *Geological Branch of Liaoning Geological Exploration and Mining Group Co. Ltd*, *Shenyang*, 110032;

3) *Liaoning Institute of Geology for Mineral Resources*, *Shenyang*, 110032;

4) *Liaoning Non-ferrous Geological Exploration and Research Institute Co.*, *Ltd*, *Shenyang*, 110013;

5) *Yunnan Earthquake Administration*, *Kunming*, 650224

Objectives: Faku ductile sheer zone located in north Liaoning is genetically related to the subduction of Paleo-Asian Ocean plate during Late Paleozoic to early Mesozoic. The study of Faku ductile sheer zone deformation will help to understand the evolution of Paleo-Asian Ocean plate.

Methods: Detailed field surveys, macro and micro structure analysis on intrusive rocks, quartz *c*-axis fabric study and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating.

Results: The deformation of Wulongshan intrusions, Gaoligou intrusions and early Shijianfang intrusions were controlled by Faku ductile shearing, whose upper plate moved northward. When it turn to later Shijianfang intrusions and Xiaofangshen intrusions, the deformation were controled by the ductile shearing, whose upper plate moved southward. The age of Gaoligou intrusions is 264.7±3.6 Ma(MSWD = 1.3), the age of early Shijianfang intrusions is 253.9±4.3 Ma(MSWD = 3.3)and the age of later Shijianfang intrusions is 244.0±3.0 Ma(MSWD = 1.9).

Conclusions: The subduction of the Paleo-Asian ocean plate happened in the east section of the northern margin of the North China Plate(northern Liaoning Province) during Late Permian(264.7~253.9 Ma), while it has translated into postcollision extension form Late Permian to Early Triassic(253.9~244.0 Ma). It is a response of subduction slab felled off from the Paleo-Asian ocean plate, and it also marks the end of the evolution of the Paleo-Asian oceanic tectonic domain. When it comes to Late Triassic Epoch the northern margin of the North China Plate(northern Liaoning Province) was under another tectonic system, and ductile shearing has nothing to do with the evolution of the Paleo-Asian Ocean Plate.

Keywords: northern margin of the North China Plate; Faku ductile sheer zone; syntectonic intrusive rocks; deformation behaviour of intrusions; Paleo-Asian ocean plate

First author: WANG Lei, male, born in 1987, master degree graduate, senior engineer, major of structural geology; Email: rexwang@cugb.edu.cn

Corresponding author: LIU Junlai, male, born in 1960, professor, doctoral advisor, major of regional structure, microstructure and lithospheric rheology; Email: jliu@cugb.edu.cn

Acknowledgements: Key projects supported by National Natural Science Foundation of China"Natural Solid Rheology and Strain Localization in The Middle Continental Crust"(No. 41430211)

Manuscript received on:2019-11-14; Accepted on:2020-06-14; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.01.021