

# 内蒙古北山地区石板井韧性剪切带西段变形特征及年龄约束

张欢,王慧,潘志龙,王硕,陈超,张金龙,张立国,李庆喆

ZHANG Huan, WANG Hui, PAN Zhilong, WANG Shuo, CHEN Chao, ZHANG Jinlong, ZHANG Ligu, LI Qingzhe

河北省区域地质调查院,河北 廊坊 065000

Hebei Institute of Regional Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China

**摘要:**石板井韧性剪切带为内蒙古北山地区4条重要的蛇绿岩带之一的石板井-小黄山构造带的重要组成部分。通过宏观、微观、显微构造形态分析发现,石板井韧性剪切带西段先后经历了2期北西西向略带逆冲分量的右行走滑型韧性剪切变形,2期韧性变形之间还发生一次明显的静态恢复重结晶作用。根据定向标本中石英、长石的显微变形特征、糜棱物中新生矿物组合及石英C轴组构分析,判断主期韧性变形温度为400~550℃,为高绿片岩相,静态恢复重结晶阶段形成环境同样为高绿片岩相,而晚期韧性变形温度为280~400℃,为低绿片岩相。根据剪切带内及周边经历不同变质变形阶段的侵入岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄,限定主期韧性变形及静态恢复重结晶阶段形成时限为435.7~405.0 Ma,晚期韧性变形形成时限为405.0~363 Ma。此外,石板井韧性剪切带是在塔里木板块和哈萨克斯坦板块沿牛圈子—蒜井子—白云山一线斜向碰撞背景下,由沿石板井-小黄山展布的古老深大断裂活化形成的。其中,早期变形形成于碰撞造山时期,晚期变形形成于碰撞造山向后造山伸展转换时期。

**关键词:**石板井-小黄山构造带;韧性剪切变形;显微构造;EBSD;锆石U-Pb年龄

**中图分类号:**P542.3;P597<sup>+</sup>.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)06-0930-12

Zhang H, Wang H, Pan Z L, Wang S, Chen C, Zhang J L, Zhang L G, Li Q Z. Geochronological constraints and deformation of the western section of Shibanjing ductile shear zone in Beishan, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(6): 930-941

**Abstract:** The Shibanjing ductile shear zone is an important component of the Shibanjing-Xiaohuangshan structural belt, one of the four ophiolite belts in Beishan area. Based on the macroscopic and microscopic structural morphology, we found that the western part of the Shibanjing ductile shear zone had undergone two stages of ductile shear deformations of dextral strike slide accompanied with a small portion of NWW-trending thrusting. The main ductile deformation was punctuated by a stage of static recrystallization. The analysis of microstructures of the quartz and feldspar, the newly-developed mineral assemblage in the mylonite, and the quartz C-axis indicates that the temperature of the main ductile deformation remained at 400~500℃ (high greenschist facies). The static recrystallization was also developed in a high greenschist facies environment, while the later-stage ductile deformation was present at 280~400℃ of low greenschist facies. Based on laser ablation (LA-ICP-MS) U-Pb dating of zircons from intrusive rocks undergoing the metamorphism and deformation stages in and around the shear zone, it is suggested that the age of the main ductile deformation and static recrystallization is 435.7~405.0 Ma, and the time limit of the later-stage ductile deformation is 405.0~363 Ma. Under the background of oblique collision between the Tarim plate and the Kazakhstan plate along the Niujuanzi-Suanjingzi-Baiyun shan, the Shibanjing

收稿日期:2020-07-15;修订日期:2020-08-21

资助项目:中国地质调查局项目《阴山成矿带小狐狸山和雅布赖地区地质矿产调查》(编号:DD20160039)、《内蒙古1:5万基东、尖山、蒜井子、三道明水等四幅区域地质矿产调查》(编号:12120113056500)和《地质调查综合智能编图系统与应用》(编号:DD20190415)

作者简介:张欢(1987-),男,硕士,工程师,从事区域地质矿产调查工作。E-mail:13731610167@139.com

ductile shear zone were formed by the reactivation of pre-existing deep-seated faults along the Shibanjing-Xiaohuangshan, the main ductile deformation occurred in collisional orogeny, while the later-stage ductile deformation occurred in transition period between collisional orogeny and post-orogenic extension.

**Key words:** Shibanjing-Xiaohuangshan structural belt; ductile shear deformation; microstructure; EBSD; zircon U-Pb isotopic ages

石板井韧性剪切带是石板井-小黄山构造带的重要组成部分,东起内蒙古额济纳旗小黄山东侧,向北西西延伸过石板井,于蒙甘边界基东地区被中生界覆盖,区域延伸约 180 km。作为北山地区 4 条重要的蛇绿岩带之一,石板井-小黄山构造带的大地构造属性一直存在较大争议<sup>[1-13]</sup>。部分学者认为,石板井-小黄山构造带是塔里木板块和哈萨克斯坦板块的分界断裂<sup>[1-3]</sup>。然而,近年来的研究结果显示,牛圈子-白云山-洗肠井蛇绿混杂岩带为塔里木板块和哈萨克斯坦板块的分界断裂<sup>[4-7, 9-11]</sup>,并先后阐明其洋壳形成年龄为 527~530 Ma<sup>[10-11]</sup>,洋壳俯冲则发生于 431~461 Ma<sup>[8-10, 12-13]</sup>,石板井地区晚奥陶世—早志留世侵入岩形成于该事件对应的岛弧环境<sup>[12-13]</sup>,而石板井-小黄山构造带位于弧后盆地环境<sup>[4-6, 14]</sup>。此外,前人在小黄山蛇绿岩的辉长岩中获得了 485±76 Ma 的 Sm-Nd 同位素年龄,并提出小黄山蛇绿岩至少经历了多期变质-变形作用,但并未对石板井韧性剪切带韧性变形的时间进行有效的限定<sup>[14-15]</sup>。本文通过野外地质调查、显微构造学、石英组构分析、锆石 U-Pb 测年等手段,对石板井韧性剪切带变形特征及其形成时限进行探讨,为进一步研究石板井-小黄山构造带的形成与演化提供依据。

## 1 区域地质概况

研究区位于北山造山带东段中部,行政区划属内蒙古额济纳旗与甘肃肃北县交界地区。石板井-小黄山构造带从区内通过,而牛圈子-白云山-洗肠井蛇绿混杂岩带位于研究区南侧,呈近东西向展布。区内古生代侵入岩大面积发育,主要包括形成于岛弧环境的早志留世石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩<sup>[13]</sup>,形成于后碰撞造山环境的早泥盆世中粒斑状正长花岗岩<sup>[16]</sup>、二长花岗岩、石英二长岩,以及晚泥盆世辉长岩、石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩等。地层方面,古元古代北山岩群(Pt<sub>1</sub>B.)主要出露于石板井-小黄山构造带北侧,具岛弧火山岩性质的奥陶纪—志留纪公婆泉组(OSg)则主要分布于构造带南侧,而早中三叠

世二断井组(T<sub>1-2</sub>er)及早白垩世赤金堡组(K<sub>1</sub>c)主要分布于研究区西北部,与下伏地质体呈角度不整合接触<sup>[17-18]</sup>。值得注意的是,区域上,石板井-小黄山构造带对中晚奥陶世—早志留世岛弧花岗岩及公婆泉组的空间分布并没有明显的控制作用。

研究区石板井-小黄山构造带呈北西西—南东东向展布,由 5 条近平行的右行走滑断裂系(F<sub>1</sub>-F<sub>5</sub>)及石板井韧性剪切带构成,构造带宽约 5 km,并被晚期北西向走滑断裂右行错断。其中,石板井韧性剪切带包括北带(Ds<sub>1</sub>)和南带(Ds<sub>2</sub>)两部分,晚奥陶世—早志留世侵入岩、早泥盆世侵入岩及北山岩群、公婆泉组均卷入韧性变形;晚泥盆世花岗岩未发生韧性变形,但被 F<sub>5</sub> 断裂破坏,并与晚奥陶世—早志留世变形侵入岩呈侵入关系。北带(Ds<sub>1</sub>)呈北西西向延伸,至 1678 高地一带被 F<sub>1</sub> 断裂破坏,最大宽度约 1.1 km,构造岩以花岗质初糜棱岩、糜棱岩为主,少量呈带状展布的花岗质超糜棱岩。南带(Ds<sub>2</sub>)呈北西西向带状展布,规模较北带大,最宽可达 2.6 km。其北界被 F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub> 断层破坏,南界除被 F<sub>5</sub> 断层破坏外还被晚泥盆世花岗闪长岩、英云闪长岩侵入,向西延伸至 1602 高地一带,被早中三叠世二断井组及早白垩世赤金堡组角度不整合覆盖。构造岩以花岗质初糜棱岩、糜棱岩及石英岩质糜棱岩、斜长角闪质糜棱岩为主,超糜棱岩基本不发育。南带南缘靠近 F<sub>5</sub> 断裂一带岩石静态恢复重结晶作用显著,发育变余花岗质糜棱岩、糜棱片岩、长英质糜棱片麻岩、石榴黑云斜长糜棱片麻岩、斜长角闪片岩等(图 1、图 2)。

## 2 石板井韧性剪切带西段变形特征

### 2.1 宏观变形特征

石板井韧性剪切带西段共发育 3 种不同重结晶类型的糜棱岩系列,即具有中温变形特征的糜棱岩系列,具静态恢复重结晶的变余糜棱岩、糜棱片麻岩系列和具有低温变形特征的糜棱岩系列。

中温变形糜棱岩系列宏观走向为北西西 280°~290°,为石板井韧性剪切带主期韧性变形形成的构

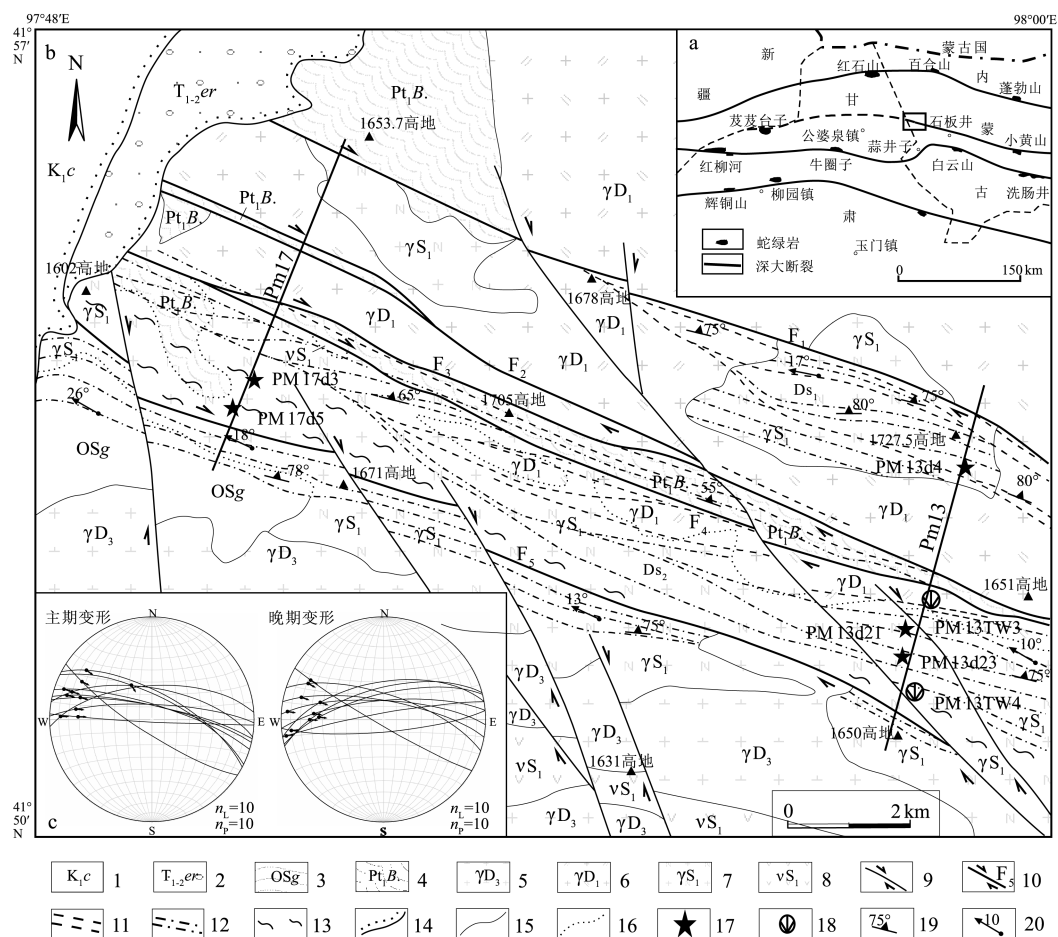


图1 石板井韧性剪切带西段地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the western part of the Shibanjing ductile shear zone

- 1—下白垩统赤金堡组; 2—上中三叠统二断井组; 3—奥陶系—志留系公婆泉组; 4—古元古界北山岩群; 5—晚泥盆世花岗岩; 6—早泥盆世花岗岩; 7—早志留世花岗岩; 8—早志留世辉长岩; 9—燕山期右行走滑断层; 10—石板井右行走滑断层系; 11—晚期韧性剪切带; 12—主期韧性剪切带; 13—变余糜棱岩、糜棱片麻岩带; 14—角度不整合界线; 15—侵入界线; 16—被韧性剪切带破坏的侵入界线; 17—石英组构分析采样点; 18—同位素测年采样点; 19—糜棱面理产状; 20—矿物拉伸线理产状

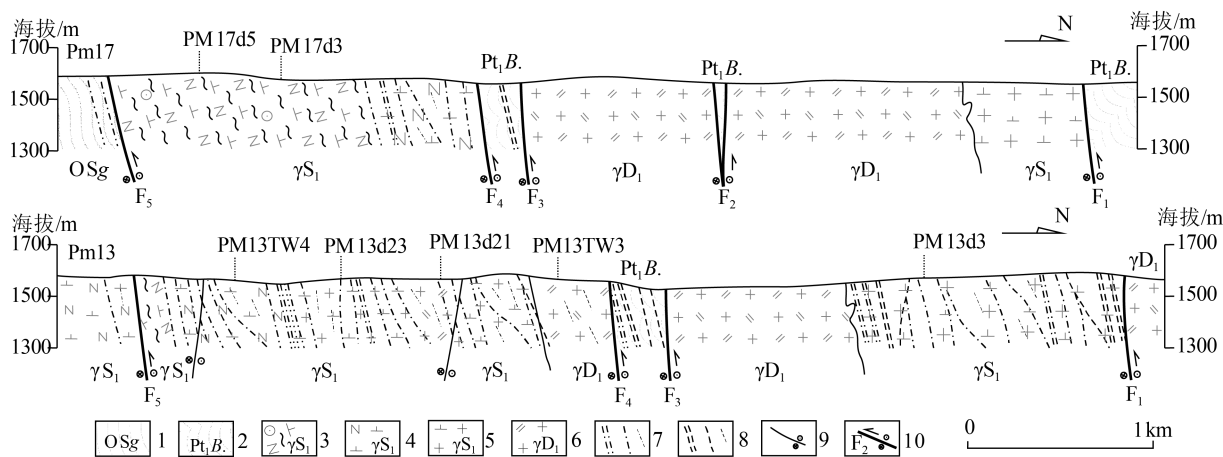


图2 石板井韧性剪切带西段地质剖面

Fig. 2 Simplified section of the western part of the Shibanjing ductile shear zone

- 1—奥陶系—志留系公婆泉组; 2—古元古界北山岩群; 3—早志留世(含石榴子石)英云花岗质糜棱片麻岩; 4—早志留世英云闪长岩; 5—早志留世花岗岩; 6—早泥盆世二长花岗岩; 7—早期糜棱岩系列; 8—晚期糜棱岩系列; 9—燕山期右行走滑断层; 10—石板井右行走滑断层系



造岩。其糜棱岩带往往呈宽带状展布,最宽处可达 3 km 以上,强变形带以糜棱岩为主,超糜岩基本不发育,岩石中糜棱物含量一般不超过 80%,弱变形域以初糜岩为主,强变形带与弱变形域过渡带较宽,通常在数十米至数百米。发生变形的地质体以前泥盆纪侵入岩及北山岩群、公婆泉组为主。岩石普遍具有糜棱结构,眼球状构造、条带状构造,拉伸线理、鞘褶皱、不对称褶皱、石香肠构造极发育,在花岗质糜棱岩中可见大量眼球状残斑,残斑多为长石,以  $\Phi$  型残斑和  $\sigma$  型残斑为主, $\delta$  型碎斑较少见,运动学特征指示为右行剪切(图版 I-a)。手标本尺度上借助放大镜观察,糜棱物中可见长英质新晶颗粒及鳞片状云母新晶。对剪切带西段不同位置该期糜棱面理、拉伸线理统计发现,糜棱面理倾向  $355^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,倾角  $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ,优选产状为  $15^{\circ}\angle 75^{\circ}$  左右,拉伸线理优选产状为  $287^{\circ}\angle 21^{\circ}$  左右,表明主期韧性剪切变形水平剪切分量远大于垂直分量,其总体运动学特征为略带少量逆冲分量的右行走滑型韧性剪切(图版 I-b)。

变余糜棱岩系列主要分布于南带  $F_3$  断裂北侧,与主期糜棱岩系列呈渐变关系。其野外宏观岩貌特征、运动学特征,以及糜棱面理、拉伸线理产状均与主期糜棱岩特征一致。两者区别在于手标本尺度上,变余糜棱岩系列往往具变余糜棱结构,眼球状构造、片麻状构造,糜棱物往往具品质结构,新生长英质晶粒多呈肉眼可区分的粒状,云母新晶多呈片状定向展布,个别岩石糜棱物中新晶颗粒可达 1 mm。

低温变形糜棱岩系列主要分布于北带及南带北缘,宏观走向  $270^{\circ}\sim 285^{\circ}$ ,为石板井韧性剪切带晚期变形产物。该期变形剪切带宽度较窄,一般在 200 m 以内,其强变形带宽度数米至十几米左右,以超糜岩为主,残斑几乎不发育,花岗质超糜岩酷似硅质岩,平行的纹层状糜棱叶理极发育;弱变形域略宽,以糜棱岩化花岗岩、初糜棱岩为主,见不对称褶皱、石香肠构造,指示右行剪切。未变形岩石至超糜棱岩之间的过渡带较窄,往往只有数十米,局部甚至出现超糜棱岩与初糜棱岩突变接触。除参与第一期变形的地质体外,早泥盆世石英二长岩、二长花岗岩、正长花岗岩等也卷入该期变形。手标本尺度上,岩石普遍具有糜棱结构,条带状构造,长石往往碎裂成透镜状,肉眼或借助放大镜几乎无法

识别糜棱物中新生矿物颗粒或重结晶特征,残斑及 S-C 组构指示右行剪切。值得注意的是,该期变形的糜棱岩带往往在局部小角度斜切第一期糜棱面理。对该期糜棱面理、拉伸线理统计发现,该期糜棱面理倾向  $345^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ,倾角  $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ,走向与主期面理存在  $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$  的夹角,优选产状约为  $357^{\circ}\angle 74^{\circ}$ ,拉伸线理优选产状为  $278^{\circ}\angle 26^{\circ}$ ,表明晚期韧性剪切变形同样为略带少量逆冲分量的右行走滑型韧性剪切。

## 2.2 显微变形特征

### 2.2.1 定向标本采集与制片

本次在石板井剪切带西段不同部位采集了 34 块具有代表性的花岗质糜棱岩定向标本。标本采集过程中,以平行拉伸线理方向为 X 轴方向,箭头指向上盘移动方向,垂直糜棱面理方向为 Z 轴方向,箭头指向上盘,垂向拉伸线理、平行糜棱面理方向为 Y 轴方向,箭头指向上方,并将 3 个轴向标于标本之上。定向薄片制片工作由河北省区域地质调查院实验室完成,将定向标本沿 XZ 面切开,Y 轴负向粘贴于载玻片之上,并磨至 30  $\mu\text{m}$  厚,抛光,并将 X 轴及 Z 轴方向标于薄片之上。

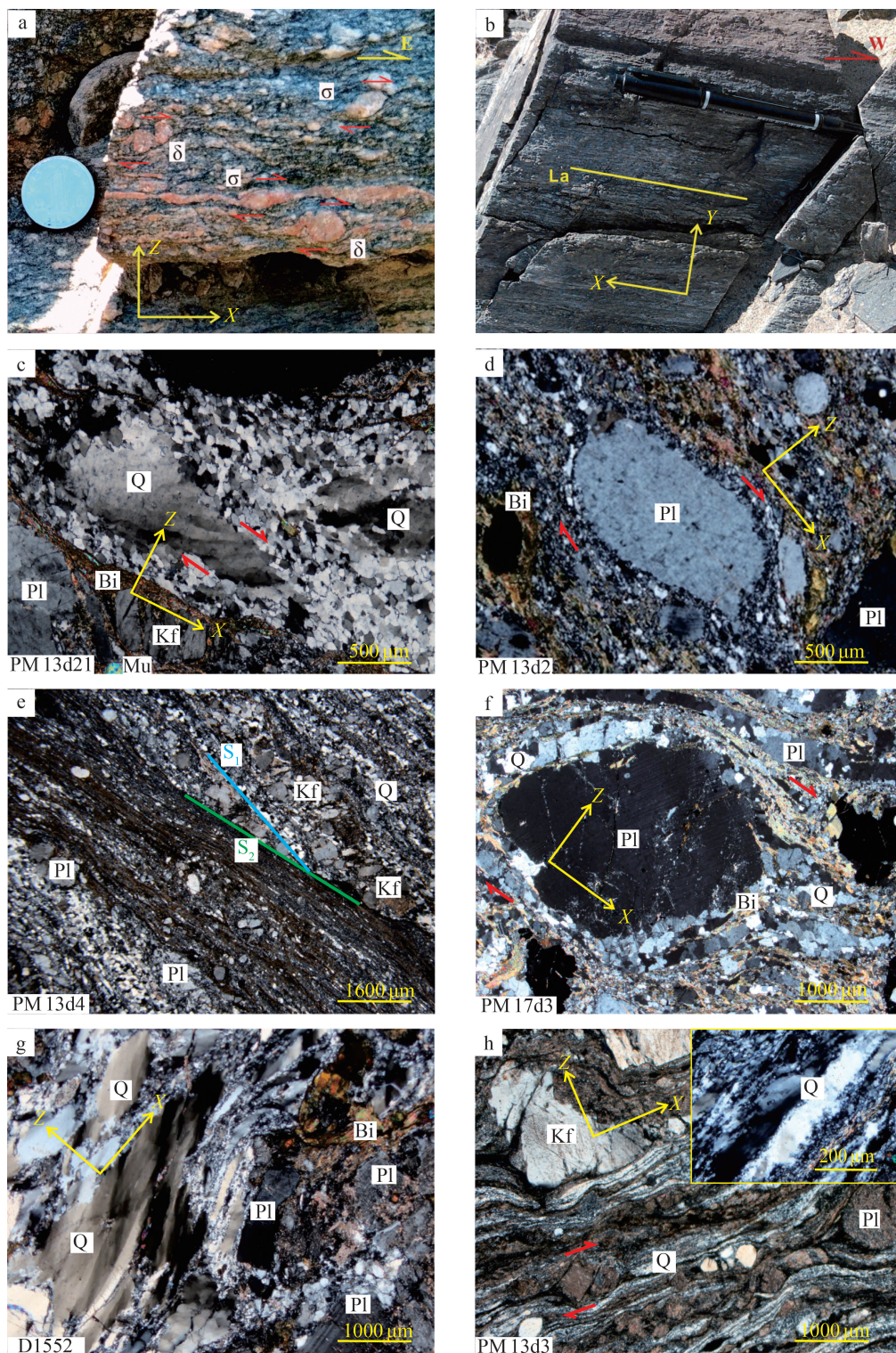
### 2.2.2 显微变形特征

岩石内部显微-超微几何要素或矿物的排列特征对变质-变形岩石形成过程、形成条件、运动学特征具有重要的指示意义<sup>[19-22]</sup>。借助显微镜观察,石板井韧性剪切带各期糜棱岩定向标本中旋转碎斑、不对称压力影、云母鱼、书斜构造、剪切破裂及 S-C 组构十分发育。旋转碎斑多为长石,偶见角闪石、石英等碎斑,多呈眼球状,在残斑两侧伴有不对称压力影发育,长石残斑普遍发育书斜构造和剪切破裂。而在云英质、角闪质糜棱岩、糜棱片岩和千糜岩中还发育云母鱼、角闪石鱼、显微 S-C 组构等。这些小构造大多指示右行剪切,与石板井韧性剪切带宏观运动学特征基本一致。

按膨凸重结晶—亚颗粒旋转动态重结晶—颗粒边界迁移动态重结晶的顺序,变形岩石中造岩矿物重结晶所需的温度逐渐增高,相应形成的新晶晶粒也随之增大<sup>[19,23]</sup>。同时,不同矿物出现不同方式的动态重结晶的温度也不同,在  $280\sim 400^{\circ}\text{C}$  低温变形条件下,石英出现边界膨凸重结晶,长石以脆性变形为主;在  $400\sim 500^{\circ}\text{C}$  中温变形条件下,石英以亚颗粒旋转重结晶为主,长石发育机械双晶、



图版 I Plate I



a.二长花岗质糜棱岩,XZ 面见  $\sigma$  型和  $\delta$  型残斑,示右行剪切;b.花岗质糜棱岩,XY 面见矿物拉伸线理,线理低角度向西倾伏;c.二长花岗质糜棱岩,石英核幔构造与亚颗粒旋转重结晶,核部具带状消光;d.花岗闪长质糜棱岩,斜长石沿边部发育膨凸重结晶现象;e.二长花岗质糜棱岩,早世代中温变形被晚世代低温变形切截;f.花岗闪长质糜棱岩片麻岩,片状、粒状边晶结构,片麻状构造,见变余眼球状残斑;g.糜棱岩化花岗闪长岩,石英带状消光及膨凸重结晶现象;h.二长花岗质糜棱岩,石英具膨凸重结晶,亚颗粒不发育,长石碎裂变形,c~h 均为正交偏光。Q—石英;Pl—斜长石;Kf—钾长石;Bi—黑云母;Mu—白云母; $S_1$ —主期糜棱面理; $S_2$ —晚期糜棱面理



波状消光和膝折, 450℃以上时, 长石发生边界膨凸重结晶, 碱性长石出现应力蠕英结构; 500~600℃高温条下, 石英表现为边界迁移重结晶, 长石则发生亚颗粒旋转重结晶<sup>[19, 23-26]</sup>。通过对定向薄片镜下分析发现, 韧性剪切带内 3 种糜棱岩系列具有完全不同的显微构造特征。

主期韧性变形以 PM13d21、PM13d23 等标本为代表。镜下显示, 石英以亚颗粒旋转动态重结晶作用为主, 具核幔构造(图版 I -c); 长石具膨凸动态重结晶特征(图版 I -d), 且多呈眼球状、书斜状, 见弯曲双晶、应力蠕英、波状消光、核幔构造、钾长石火焰状出溶条纹等现象; 糜棱物中新晶颗粒包括长石、石英、黑云母、白云母等。这些特征均代表了中级变质条件(400~600℃)下的韧性变形特征, 变质相相当于高绿片岩相, 局部可能达到低角闪岩相。除上述主期变形特征外, 镜下往往可见 2 期糜棱面理交切特征, 晚期糜棱面理往往呈窄带状(一般宽 0.2~3 mm)截切早期糜棱面理(图版 I -e)。

变余糜棱岩系列以 PM17d3、PM17d5 等标本为代表。镜下石英多呈矩形多晶条带, 带内石英颗粒具稳定的六边形边界和三节点结构; 新生长石则多呈粒状镶嵌于眼球状残斑周围, 边界均趋于三节点结构, 定向特征、消光及变形双晶消退, 早期裂隙被新生粒状长英质充填; 云母则定向增大, 变形纹、裂隙消失, 晶体边界也趋于平直(图版 I -f); 新生矿物可见黑云母、石英、斜长石、钾长石及少量角闪石。这些特征表明, 石板井韧性剪切带主期韧性变形之后局部发生了明显的静态恢复重结晶作用。根据新生矿物组合判断, 静态重结晶发生的温度条件为 450~600℃的变质环境, 相当于高绿片岩相变质。除上述特征外, 镜下还可见晚期低温糜棱面理截切片理、片麻理特征。

晚期变形以 PM13d3、D1552 等标本为代表, 岩石具糜棱结构, 条带状构造, 眼球状残斑较小, 糜棱物以隐晶结构、霏细结构为主。镜下石英变形特征与前 2 种类型差异明显, 弱应变岩石中石英波状消光极发育, 仅在晶体边缘发生膨凸动态重结晶(图版 I -g), 强应变岩石中石英在单偏光下则呈丝带状单晶条带, 正交偏光下一般不发育典型的亚颗粒, 而单晶颗粒平行于糜棱面理一侧往往出现压溶叶理或膨凸动态重结晶; 长石变形则以碎裂变形为主, 机械双晶发育, 几乎不发生重结晶现象和压溶

叶理(图版 I -h)。新生矿物多以绿帘石、绢云母、石英、绿泥石等为主。上述特征均指示一种低温变形环境, 其变形温度为 280~400℃, 相当于低绿片岩相。

### 3 实验测试

#### 3.1 样品采集及实验方法

##### 3.1.1 石英 C 轴 EBSD 组构

石英 C 轴 EBSD 组构分析通过测试多个石英晶体背散射衍射图像来确定晶轴方向, 进而较客观地反映石英晶体颗粒排列优选方位, 进一步提供石英定向滑移系类型及变形温度信息<sup>[20-21, 23]</sup>。本次在显微构造分析的基础上选取了 5 块具有代表性的定向标本进行石英 C 轴 EBSD 组构分析测试。EBSD 石英 C 轴组构分析样品沿 XZ 面进行磨片并抛光, 实验在中国地质大学(北京)完成, 实验过程中采用胶条导电, 通过人机交互式手动选点, 在糜棱物中选择 200 粒以上新生石英颗粒进行统计, 详细制片及实验测试过程参考文献[20]。

##### 3.1.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

本次为了限定石板井韧性剪切带西段韧性剪切变形形成时限, 共采集了 2 个锆石同位素年龄样品。为保证挑选锆石数量及质量达到测试要求, 采集的样品均为成分均匀、新鲜未风化岩石, 样品重量约 10 kg。采用常规方法碎样, 通过浮选和电磁方法进行分选, 在双目镜下挑选晶形完整、无裂隙和包裹体的锆石颗粒进行制靶, 对锆石靶打磨抛光后, 进行反射光、透射光和阴极发光显微照相, 观察锆石外观及形态。锆石分选在河北省区域地质调查院实验室完成, 锆石制靶及阴极发光拍照在北京铭年领航科技有限公司完成。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在天津地质调查中心同位素实验室完成。实验前采用美国国家标准研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST RSM 610 进行仪器校正。实验过程中激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式, 数据采集选用 1 个质量峰 1 个点的跳峰方式, 每完成 8 个测点的样品测定, 加测标样 1 次, 以保证测试的精度。锆石年龄采用 91500 为外标标准物质, 元素含量采用 NIST RSM 610 为外标, <sup>29</sup>Si 为内标, 详细实验测试过程可参考文献[27]。数据处理通过 GLITTER(ver4.2)软件处理, 并按照 Anderson 的方法用 LA-ICP-MS

Common Lead Correction (ver3.15) 对其进行普通铅校正, 年龄计算和谐图绘制采用 Isoplot (ver3.0) 程序完成。

### 3.2 测试结果

#### 3.2.1 石英 C 轴 EBSD 组构分析结果

根据石英 C 轴组构图 (图 3), PM13d4 (二长花岗质糜棱岩)、PM13d21 (二长花岗质初糜岩)、PM13d23 (花岗闪长质糜棱岩) 3 个标本中点极密及大圆环带均发育, 主极密位于 XZ 轴交点位置, 并略向 Z 轴偏移, 代表石英滑移系以柱面<a>滑移为主, 菱面<a>滑移为辅, 指示 400~550℃ 的中温变形环境; 大圆环带沿 Z 轴分布, 略有顺时针偏移, 次级点极密靠近 Z 轴边缘位置, 代表了石英底面<a>滑移, 指示低于 400℃ 的低温变形环境。其整体反映了变形温度由中温向低温演化的过程, 剪切方向均为右行剪切。PM17d3 (花岗闪长质糜棱片麻岩) 标本中主极密位于 XZ 轴交点位置, 略微具有向 Z 轴偏移特征, 指示石英滑移系以柱面<a>滑移为主, 为中温变形 (变质) 特征。PM17d5 (二云斜长糜棱片麻岩) 标本除位于 XZ 轴交点位置的主极密外, 还发育不显著的大圆环带及次级极密, 其中心位于 Z 轴边缘, 指示中温变形 (变质) 后叠加了较微弱的右行低温剪切变形。综合上述, 石英 C 轴组构反映的变形温度特征与镜下显微构造学特征反映的结果基本一致。

#### 3.2.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

本次在石板井韧性剪切带采集了 2 个锆石同位素年龄样品。其中, PM13TW3 样品为糜棱岩化中粒石英二长岩, 采于该岩体中的 4 个定向标本镜下均显示其仅经历了晚期低温韧性变形, 其年龄可以约束主期变形的上限年龄; PM13TW4 样品为花岗闪长质糜棱岩, 采于该岩体的 8 个定向标本镜下均显示经历了主期韧性变形和不同程度的静态恢复重结晶作用, 其年龄数据可以控制主期变形的下限年龄。

PM13TW4 样品锆石多数呈短柱状, 半自形-自

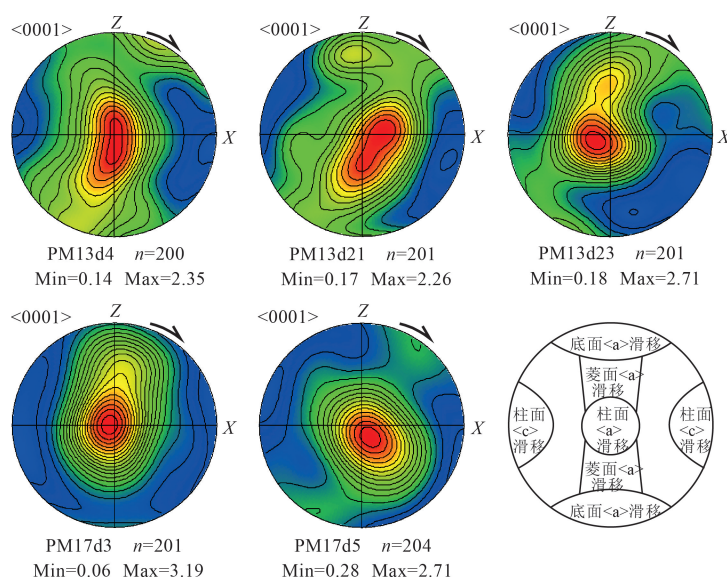


图 3 石板井韧性剪切带糜棱岩中石英 C 轴组构

Fig. 3 C-axis fabric stereograms of quartz from mylonites in the Shibanjing ductile shear zone

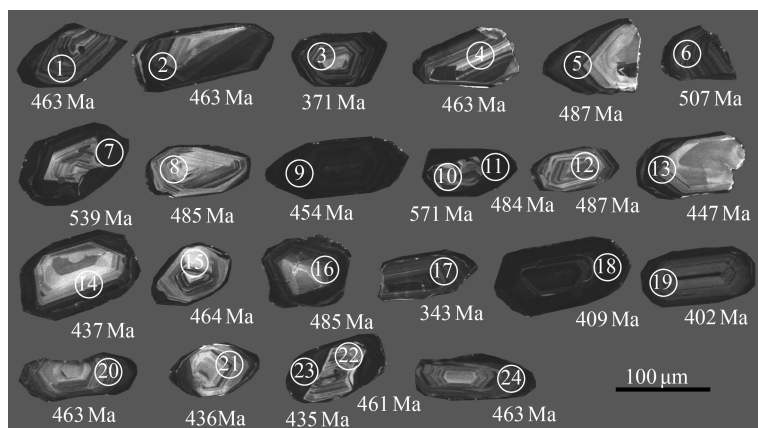


图 4 石板井韧性剪切带 PM13TW4 样品锆石阴极发光 (CL)

图像及测点位置、U-Pb 年龄

Fig. 4 CL images, U-Pb ages and dating spots of PM13TW4 sample from the Shibanjing ductile shear zone

形, 振荡环带发育, 边部具熔蚀特征 (图 4), 为岩浆锆石。对晶形较好的 22 颗锆石共分析了 24 个测点 (表 1), 其中 11、22 号点为残留核。Th/U 值变化于 0.02~0.88 之间。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在 371~571 Ma 之间, 除 8 个谐和性差的年龄外, 有 3 组年龄, 年龄加权平均值分别为  $435.7 \pm 4.6$  Ma ( $n=4$ , MSWD = 0.101)、 $462.7 \pm 3.8$  Ma ( $n=7$ , MSWD = 0.026)、 $485.6 \pm 4.5$  Ma ( $n=5$ , MSWD = 0.068) (图 5)。22 号点 (残留核) 和 23 号点 (结晶边) 的年龄分别为 461 Ma、435 Ma, 指示年龄加权平均值  $462.7 \pm 3.8$  Ma 和



485.6±4.5 Ma 为早期残留锆石年龄。由此认为, 该岩体的形成年龄为 435.7±4.6 Ma。

PM13TW3 样品锆石呈短柱状或等轴状, 半自形-自形, 振荡环带较发育(图 6)。对晶形较好的 21 颗锆石共分析了 21 个测点(表 2)。Th/U 值在 0.34~0.59 之间, 平均 0.49, 显示岩浆锆石特征。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在 398~511 Ma 之间, 除 5、13、16、19、21 号点偏离谐和线外, 其余年龄均位于谐和线上, 呈串状分布, 下端出现年龄集中点, 年龄加权平均值为 405.0±3.4 Ma ( $n=8$ , MSWD=0.102) (图 7)。由于不同年龄的锆石形态差别不大, 推断该样品代表的岩体结晶年龄为 405.0±3.4 Ma, 而较老的年龄可能代表早期岩浆事件年龄。

## 4 讨 论

### 4.1 石板井韧性剪切带西段变形期次及形成温度条件

野外调查及显微构造分析发现, 石板井韧性剪切带西段先后经历了主期韧性剪切变形、静态恢复重结晶及晚期韧性剪切变形 3 个阶段。

主期韧性变形中石英以亚颗粒旋转动态重结晶作用为主, 具核幔构造; 长石具膨凸动态重结晶

特征, 见弯曲双晶、应力蠕英、波状消光、核幔构造、钾长石火焰状出溶条纹等; 糜棱物中新晶颗粒包括长石、石英、黑云母、白云母等。石英 C 轴组构分析显示, 早期韧性变形岩石中石英以中温柱面<a>滑移系为主, 兼有向菱面<a>滑移系过渡趋势, 并叠加有晚期低温底面<a>滑移系。上述特征均指示了中级变质条件(400~550℃)下的韧性变形特征, 其变质相相当于高绿片岩相, 局部可能达到低角闪岩相。如果按 3℃/100 m 的正常地温梯度计算, 主期韧性变形形成深度为 13~18 km。

静态恢复重结晶阶段, 岩石普遍具片、粒状平衡稳定变晶结构, 早期糜棱物静态恢复重结晶作用明显。其中, 石英多呈矩形多晶条带, 带内石英颗粒具稳定的六边形边界和三节点结构; 长石则多呈粒状、镶嵌状, 定向特征、消光及变形双晶消退, 韧性变形形成的长石残斑仍有保留, 但边界均趋于三节点结构, 早期裂隙被新生粒状长英质充填; 云母定向增大, 变形纹、裂隙消失, 晶体边界也趋于平直。根据新生矿物组合及重结晶矿物判断, 静态重结晶发生的温度条件与第一期变形极相近, 同为 450~600℃的高绿片岩相变质环境。

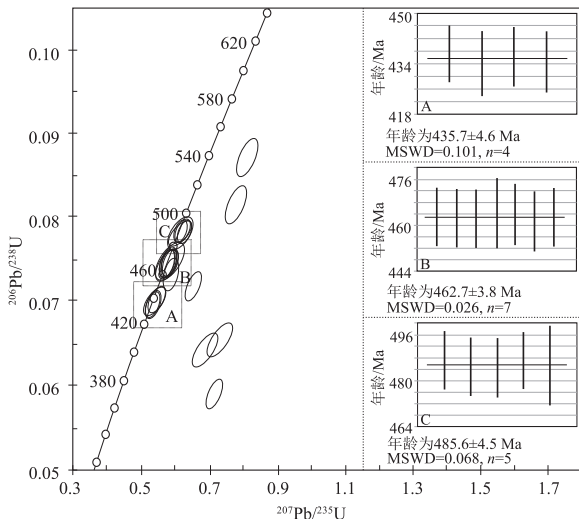


图 5 石板井韧性剪切带 PM13TW4 样品锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram of PM13TW4 sample from the Shibanjing ductile shear zone

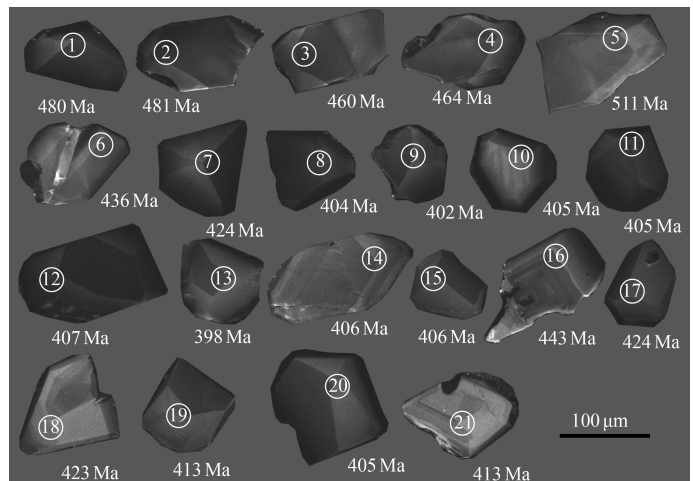


图 6 石板井韧性剪切带 PM13TW3 样品锆石阴极发光 (CL) 图像及测点位置、U-Pb 年龄

Fig. 6 CL images, U-Pb ages and dating spots of PM13TW3 sample from the Shibanjing ductile shear zone

表 1 石板井韧性剪切带 PM13TW4 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果  
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of PM13TW4 sample from the Shibanjing ductile shear zone

| 测点 | 含量/ $10^{-6}$ |      | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | 同位素比值                            |           |                                  |           |                                   |           | 年龄/Ma                            |           |                                  |           |                                   |           |
|----|---------------|------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
|    | Pb            | U    |                                  | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ |
| 1  | 51            | 673  | 0.320                            | 0.0745                           | 0.0008    | 0.5805                           | 0.0081    | 0.0565                            | 0.0007    | 463                              | 5         | 465                              | 6         | 473                               | 28        |
| 2  | 33            | 444  | 0.325                            | 0.0744                           | 0.0008    | 0.5819                           | 0.0091    | 0.0567                            | 0.0008    | 463                              | 5         | 466                              | 7         | 481                               | 30        |
| 3  | 80            | 1281 | 0.175                            | 0.0593                           | 0.0007    | 0.7132                           | 0.0095    | 0.0873                            | 0.0011    | 371                              | 4         | 547                              | 7         | 1366                              | 25        |
| 4  | 28            | 318  | 0.875                            | 0.0744                           | 0.0008    | 0.5877                           | 0.0097    | 0.0573                            | 0.0008    | 463                              | 5         | 469                              | 8         | 503                               | 33        |
| 5  | 63            | 818  | 0.215                            | 0.0785                           | 0.0008    | 0.6152                           | 0.0082    | 0.0569                            | 0.0007    | 487                              | 5         | 487                              | 7         | 486                               | 26        |
| 6  | 67            | 769  | 0.426                            | 0.0818                           | 0.0009    | 0.7772                           | 0.0125    | 0.0689                            | 0.0009    | 507                              | 6         | 584                              | 9         | 897                               | 27        |
| 7  | 77            | 903  | 0.094                            | 0.0872                           | 0.0009    | 0.8101                           | 0.0114    | 0.0674                            | 0.0009    | 539                              | 6         | 602                              | 8         | 850                               | 27        |
| 8  | 18            | 218  | 0.431                            | 0.0781                           | 0.0008    | 0.6125                           | 0.0131    | 0.0569                            | 0.0011    | 485                              | 5         | 485                              | 10        | 488                               | 43        |
| 9  | 290           | 4254 | 0.020                            | 0.0730                           | 0.0007    | 0.5933                           | 0.0082    | 0.0590                            | 0.0007    | 454                              | 5         | 473                              | 7         | 566                               | 26        |
| 10 | 164           | 1609 | 0.099                            | 0.0926                           | 0.0009    | 1.5130                           | 0.0323    | 0.1185                            | 0.0025    | 571                              | 6         | 936                              | 20        | 1934                              | 38        |
| 11 | 64            | 847  | 0.184                            | 0.0780                           | 0.0008    | 0.6234                           | 0.0085    | 0.0580                            | 0.0007    | 484                              | 5         | 492                              | 7         | 528                               | 26        |
| 12 | 38            | 476  | 0.424                            | 0.0785                           | 0.0008    | 0.6197                           | 0.0091    | 0.0573                            | 0.0008    | 487                              | 5         | 490                              | 7         | 503                               | 30        |
| 13 | 67            | 947  | 0.274                            | 0.0718                           | 0.0007    | 0.6542                           | 0.0091    | 0.0661                            | 0.0008    | 447                              | 5         | 511                              | 7         | 808                               | 25        |
| 14 | 25            | 360  | 0.350                            | 0.0702                           | 0.0007    | 0.5471                           | 0.0092    | 0.0565                            | 0.0009    | 437                              | 4         | 443                              | 7         | 474                               | 35        |
| 15 | 8             | 101  | 0.692                            | 0.0746                           | 0.0010    | 0.5876                           | 0.0177    | 0.0571                            | 0.0016    | 464                              | 6         | 469                              | 14        | 495                               | 62        |
| 16 | 17            | 212  | 0.432                            | 0.0781                           | 0.0011    | 0.6137                           | 0.0148    | 0.0570                            | 0.0010    | 485                              | 7         | 486                              | 12        | 491                               | 41        |
| 17 | 27            | 398  | 0.381                            | 0.0697                           | 0.0008    | 0.5369                           | 0.0086    | 0.0559                            | 0.0008    | 434                              | 5         | 436                              | 7         | 449                               | 30        |
| 18 | 68            | 1044 | 0.178                            | 0.0655                           | 0.0007    | 0.7328                           | 0.0136    | 0.0811                            | 0.0012    | 409                              | 5         | 558                              | 10        | 1224                              | 28        |
| 19 | 36            | 549  | 0.231                            | 0.0644                           | 0.0007    | 0.6892                           | 0.0150    | 0.0776                            | 0.0017    | 402                              | 5         | 532                              | 12        | 1137                              | 45        |
| 20 | 16            | 210  | 0.428                            | 0.0745                           | 0.0009    | 0.5825                           | 0.0112    | 0.0567                            | 0.0010    | 463                              | 5         | 466                              | 9         | 480                               | 37        |
| 21 | 15            | 194  | 0.673                            | 0.0701                           | 0.0007    | 0.5420                           | 0.0113    | 0.0561                            | 0.0011    | 436                              | 5         | 440                              | 9         | 457                               | 43        |
| 22 | 17            | 210  | 0.585                            | 0.0742                           | 0.0008    | 0.5778                           | 0.0139    | 0.0565                            | 0.0012    | 461                              | 5         | 463                              | 11        | 473                               | 47        |
| 23 | 40            | 601  | 0.096                            | 0.0698                           | 0.0008    | 0.5366                           | 0.0079    | 0.0558                            | 0.0007    | 435                              | 5         | 436                              | 6         | 444                               | 28        |
| 24 | 27            | 354  | 0.387                            | 0.0744                           | 0.0008    | 0.5805                           | 0.0091    | 0.0566                            | 0.0008    | 463                              | 5         | 465                              | 7         | 476                               | 30        |

晚期韧性变形岩石中,糜棱面理明显小角度截切早期糜棱面理及静态恢复重结晶形成的片麻理。石英波状消光极发育,以膨凸重结晶作用为主,强应变岩石中石英则呈丝带状单晶条带,亚颗粒不发育,并出现压溶叶理;长石变形以碎裂变形为主,机械双晶发育。新生矿物以绿帘石、绢云母、石英、绿泥石等为主。从石英 C 轴组构分析结果可见,柱面

<a>、菱面<a>和底面<a>滑移系同时存在,为典型的 2 期韧性剪切叠加组构特征。另据最新报道,在石板井韧性剪切带中段获得了典型的石英低温组构数据<sup>①</sup>,进一步证实了晚期低温韧性变形的存在。上述特征均表明,晚期韧性变形形成温度为 280~400℃,相当于低绿片岩相变质环境。如果按 3℃/100 m 的正常地温梯度计算,晚期韧性变形形成深度为 10~13 km。



表 2 石板井韧性剪切带 PM13TW3 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果  
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of PM13TW3 sample from the Shibanjing ductile shear zone

| 测点 | 含量/ $10^{-6}$ |     | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | 同位素比值                            |            |                                  |            |                                   |            |                                  |            | 年龄/Ma                            |            |                                   |            |
|----|---------------|-----|----------------------------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
|    | Pb            | U   |                                  | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 $\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 $\sigma$ |
| 1  | 12            | 150 | 0.502                            | 0.0773                           | 0.0010     | 0.6117                           | 0.0146     | 0.0574                            | 0.0013     | 480                              | 6          | 485                              | 12         | 506                               | 49         |
| 2  | 9             | 111 | 0.460                            | 0.0774                           | 0.0010     | 0.6105                           | 0.0172     | 0.0572                            | 0.0015     | 481                              | 6          | 484                              | 14         | 499                               | 59         |
| 3  | 9             | 114 | 0.532                            | 0.0739                           | 0.0010     | 0.5827                           | 0.0183     | 0.0572                            | 0.0017     | 460                              | 6          | 466                              | 15         | 498                               | 65         |
| 4  | 7             | 93  | 0.468                            | 0.0746                           | 0.0010     | 0.5856                           | 0.0202     | 0.0569                            | 0.0018     | 464                              | 6          | 468                              | 16         | 488                               | 71         |
| 5  | 4             | 50  | 0.535                            | 0.0825                           | 0.0009     | 0.7700                           | 0.0513     | 0.0677                            | 0.0044     | 511                              | 6          | 580                              | 39         | 859                               | 136        |
| 6  | 6             | 79  | 0.496                            | 0.0699                           | 0.0009     | 0.5443                           | 0.0294     | 0.0564                            | 0.0028     | 436                              | 6          | 441                              | 24         | 470                               | 109        |
| 7  | 10            | 144 | 0.474                            | 0.0680                           | 0.0009     | 0.5259                           | 0.0161     | 0.0561                            | 0.0015     | 424                              | 5          | 429                              | 13         | 457                               | 61         |
| 8  | 11            | 169 | 0.448                            | 0.0647                           | 0.0007     | 0.4931                           | 0.0115     | 0.0553                            | 0.0012     | 404                              | 5          | 407                              | 10         | 423                               | 48         |
| 9  | 6             | 87  | 0.571                            | 0.0643                           | 0.0008     | 0.4888                           | 0.0198     | 0.0551                            | 0.0022     | 402                              | 5          | 404                              | 16         | 417                               | 89         |
| 10 | 5             | 84  | 0.455                            | 0.0649                           | 0.0008     | 0.5019                           | 0.0195     | 0.0561                            | 0.0022     | 405                              | 5          | 413                              | 16         | 456                               | 86         |
| 11 | 9             | 144 | 0.488                            | 0.0649                           | 0.0008     | 0.5017                           | 0.0142     | 0.0561                            | 0.0015     | 405                              | 5          | 413                              | 12         | 455                               | 60         |
| 12 | 21            | 314 | 0.450                            | 0.0651                           | 0.0008     | 0.5031                           | 0.0090     | 0.0560                            | 0.0009     | 407                              | 5          | 414                              | 7          | 453                               | 34         |
| 13 | 5             | 72  | 0.591                            | 0.0637                           | 0.0009     | 0.5716                           | 0.0329     | 0.0651                            | 0.0031     | 398                              | 6          | 459                              | 26         | 778                               | 101        |
| 14 | 6             | 82  | 0.582                            | 0.0650                           | 0.0008     | 0.4947                           | 0.0226     | 0.0552                            | 0.0025     | 406                              | 5          | 408                              | 19         | 420                               | 99         |
| 15 | 7             | 97  | 0.556                            | 0.0650                           | 0.0008     | 0.4972                           | 0.0192     | 0.0554                            | 0.0021     | 406                              | 5          | 410                              | 16         | 430                               | 84         |
| 16 | 7             | 92  | 0.568                            | 0.0712                           | 0.0021     | 0.6279                           | 0.0827     | 0.0640                            | 0.0033     | 443                              | 13         | 495                              | 65         | 740                               | 108        |
| 17 | 8             | 113 | 0.507                            | 0.0680                           | 0.0008     | 0.5295                           | 0.0162     | 0.0565                            | 0.0017     | 424                              | 5          | 431                              | 13         | 471                               | 66         |
| 18 | 6             | 82  | 0.392                            | 0.0678                           | 0.0008     | 0.5263                           | 0.0216     | 0.0563                            | 0.0023     | 423                              | 5          | 429                              | 18         | 464                               | 89         |
| 19 | 11            | 166 | 0.337                            | 0.0662                           | 0.0007     | 0.5414                           | 0.0126     | 0.0593                            | 0.0013     | 413                              | 4          | 439                              | 10         | 579                               | 49         |
| 20 | 9             | 135 | 0.446                            | 0.0649                           | 0.0007     | 0.4988                           | 0.0143     | 0.0558                            | 0.0015     | 405                              | 5          | 411                              | 12         | 443                               | 61         |
| 21 | 6             | 85  | 0.496                            | 0.0662                           | 0.0007     | 0.5584                           | 0.0220     | 0.0611                            | 0.0024     | 413                              | 4          | 450                              | 18         | 644                               | 84         |

4.2 石板井韧性剪切带活动时限

本次分别在石板井韧性剪切带西段糜棱岩化中粒石英二长岩、花岗闪长质糜棱岩中获得了  $405.0 \pm$

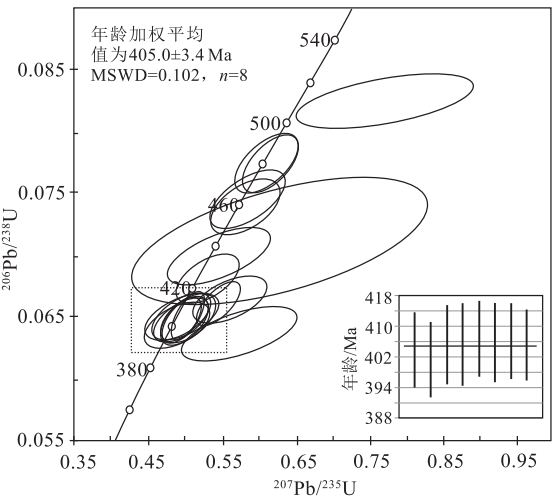


图 7 石板井韧性剪切带 PM13TW3 样品锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagram of PM13TW3 sample from the Shibanjing ductile shear zone

3.4 Ma、 $435.7 \pm 4.6$  Ma 的锆石 U-Pb 同位素年龄。其中,石英二长岩与  $F_1$  断裂北侧敖包呼图仁正长花岗岩隶属同期岩浆序列,后者锆石 U-Pb 同位素年龄为  $398.15 \pm 0.85$  Ma<sup>[16]</sup>;而前人在石板井东部处于相同构造位置的花岗闪长岩中获得锆石 U-Pb 同位素年龄为  $444 \pm 12$  Ma<sup>[13]</sup>,与本次花岗闪长质糜棱岩测得的锆石 U-Pb 同位素年龄较吻合。综上所述,本次工作活动的年龄数据较可靠。此外,位于  $F_5$  断裂南侧侵入石板井韧性剪切带的未变形中粒花岗闪长岩锆石 U-Pb 同位素年龄为 363 Ma,为晚泥盆世<sup>[28]</sup>。

采自中粒石英二长岩中的 4 个定向标本,镜下均显示其仅经历了晚期低温韧性变形,年龄可以代表主期韧性变形的上限年龄;采自花岗闪长质糜棱岩中的 8 个定向标本,镜下均显示其经历了主期韧性变形和不同程度的静态恢复重结晶作用,因此年龄可以控制主期变形的下限年龄;而侵入石板井韧性剪切带的未变形中粒花岗闪长岩的年龄,可以代表韧性剪切变形结束的上限年龄。

#### 4.3 石板井-小黄山构造带形成环境

研究区及邻区关于石板井小黄山构造带在中奥陶世以前的地质记录及相关报道较少,前人仅在小黄山蛇绿岩套中获得了  $485 \pm 76$  Ma 的辉长岩 Sm-Nd 等时线年龄<sup>[14]</sup>,略早于目前认为的红柳河-月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带代表的古亚洲洋开始俯冲的时间,即 470 Ma<sup>[29-32]</sup>。此外,笔者对石板井-小黄山构造带内一套石榴黑云斜长片麻岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,样品锆石具明显的核-边结构,核部年龄大多集中于 1090~1170 Ma 之间,边部年龄集中于 456~496 Ma 之间,并初步获得了  $420 \pm 18$  Ma 的下交点年龄和  $1728 \pm 31$  Ma 的上交点年龄(未发表),该数据也表明石板井-小黄山构造带存在更老的构造活动。因此,石板井-小黄山构造带在红柳河-月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带俯冲以前,可能存在一条切穿下地壳的深大断裂,但其构造特征及构造属性还存在较大疑问。

中奥陶世—早志留世,具有 I 型花岗岩特征的闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩组合在石板井-小黄山构造带南北两侧及带内广泛发育,其形成时代均介于 470~431 Ma 之间,并具有相似的地球化学特征,且被认为形成于古亚洲洋沿红柳河—月牙山—洗肠井一线向北强烈俯冲的岛弧环境<sup>[13, 29-32]</sup>。前人在白云山、月牙山蛇绿混杂岩中获得的 536~496 Ma 洋壳年龄及 442~421 Ma 的俯冲年龄也印证了上述观点<sup>[7, 10-11, 33-34]</sup>。综上所述,石板井-小黄山构造带对石板井地区中奥陶世—早志留世 I 型花岗岩的空间分布不具控制作用,此时其可能不活动或活动微弱,而红柳河-月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带应该是塔里木板块和哈萨克斯坦板块的分界断裂。

早泥盆世,红柳河-月牙山-洗肠井蛇绿混杂岩带以北地区发育了大规模的 A 型花岗岩,年龄在 415~397 Ma 之间,其中包含研究区北部及石板井韧性剪切带内的正长花岗岩、石英二长岩,表明早泥盆世北山地区构造环境已经由碰撞造山阶段向后造山或造山晚期伸展阶段转换<sup>[16, 35-38]</sup>。而石板井-小黄山构造带的主期韧性剪切变形发生于早泥盆世之前的碰撞造山阶段,此时石板井南部地区,塔里木板块和哈萨克斯坦板块斜向汇聚,形成沿牛圈子—蒜井子—白云山、黄山、月牙山一线展布的 S 型构造<sup>②</sup>,诱发了石板井-小黄山古老的深大断裂

活化,形成了石板井压性右行韧性剪切带。早泥盆世,石板井地区地质环境由碰撞造山向造山后伸展转换,挤压应力逐渐减弱,同时由于造山带强烈的剥蚀,石板井韧性剪切带的活动性逐渐减弱并向上逐渐接近地表,形成了晚期较弱的低温韧性剪切变形。

#### 5 结 论

(1)通过对宏观、微观、显微构造形态分析,石板井韧性剪切带先后经历了主期中温韧性剪切变形、静态恢复重结晶和晚期低温韧性剪切变形 3 个阶段。2 期韧性变形均为北西西向略具逆冲分量的右行走滑型韧性剪切变形,2 期糜棱面理呈小角度交切。

(2)通过对石板井韧性剪切带内定向标本石英、长石的显微变形特征、新生矿物组合及石英 C 轴组构分析,判断主期韧性变形温度在 400~550℃ 之间,为高绿片岩相,静态恢复重结晶阶段同样为高绿片岩相,而晚期韧性变形温度为 280~400℃,为低绿片岩相。

(3)在经历了主期韧性变形及静态恢复重结晶作用的花岗闪长质糜棱岩中获得了  $435.7 \pm 4.6$  Ma 的锆石 U-Pb 年龄,在仅经历了晚期韧性变形的糜棱岩化石英二长岩中获得了  $405.0 \pm 3.4$  Ma 的锆石 U-Pb 年龄,限定了石板井韧性剪切带主期韧性变形及静态恢复重结晶阶段形成时限为 435.7~405.0 Ma,相当于早志留世—早泥盆世。此外,根据前人在侵入石板井韧性剪切带的花岗闪长岩中获得的 U-Pb 年龄,晚期韧性变形形成时限为 405.0~363 Ma,相当于早泥盆世—晚泥盆世。

(4)石板井韧性剪切带是在塔里木板块和哈萨克斯坦板块沿牛圈子—蒜井子—白云山一线斜向碰撞背景下,由沿石板井—小黄山展布的古老深大断裂活化形成的。两期韧性变形分别形成于碰撞造山阶段和碰撞造山向后造山伸展转换阶段。

**致谢:**天津地质调查中心同位素实验室袁海帆工程师及中国地质大学(北京)刘俊来教授团队对本文实验数据处理及结果进行了指导,并提出了宝贵建议;《内蒙古 1:5 万基东、尖山、蒜井子、三道明水区域地质矿产调查》项目组及《空白区 1:25 万地质图智能编制与示范》项目组为本论文提供了详实的野外资料,在此一并表示诚挚的谢意。

## 参考文献

- [1] 左国朝,何国琦.北山板块构造及成矿规律[M].北京:北京大学出版社,1990:1-209.
- [2] 左国朝,刘义科,刘春燕.甘新蒙北山地区构造格局及演化[J].甘肃地质学报,2003,12(1):1-15.
- [3] 左国朝,李茂松.甘蒙北山地区早古生代岩石圈形成与演化[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1996:1-120.
- [4] 徐学义,何世平,王洪亮,等.中国西北部地质概论——秦岭、祁连、天山地区[M].北京:科学出版社,2008:1-347.
- [5] 杨合群,李英,赵国斌,等.北山蛇绿岩特征及构造属性[J].西北地质,2010,43(1):26-36.
- [6] 何世平,周会武,任秉琛,等.甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化[J].西北地质,2005,38(3):6-15.
- [7] 廖云峰,胡新苗,程海峰,等.内蒙古月牙山蛇绿岩的岩石学、地球化学特征及其地质意义[J].地质通报,2016,35(8):1243-1254.
- [8] 杨鑫朋,田粉英,王硕,等.内蒙古横蛮山组类高镁安山岩年代学及地球化学特征[J].中国地质调查,2018,5(5):58-65.
- [9] 王国强.北山古生代蛇绿岩、火山岩研究与构造演化[D].长安大学博士学位论文,2015.
- [10] 胡新苗,赵国春,胡新悦,等.内蒙古北山地区月牙山蛇绿质构造混杂岩带地质特征、形成时代及大地构造意义[J].地质通报,2015,34(2/3):425-436.
- [11] 胡醒民,廖云峰,程海峰,等.内蒙古月牙山一带基性火山岩的地质特征、形成时代及归属[J].地质通报,2016,35(8):1234-1242.
- [12] 赵志雄,贾元琴,王金荣,等.内蒙古小黑山地区二长花岗岩和石英闪长岩的锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及其地质意义[J].地球科学,2018,34(25):49-59.
- [13] 董洪凯,孟庆涛,刘广,等.内蒙古北山地区标山一带早志留世花岗岩地球化学特征及构造意义[J].西北地质,2018,51(1):159-174.
- [14] 宋泰忠,王瑾,林海,等.内蒙古北山地区小黄山蛇绿岩地质特征[J].西北地质,2008,41(3):55-63.
- [15] 周国庆,陈小明,赵建新.内蒙古石板井-黄山与蛇绿岩相伴的变质岩及其演化[J].高校地质学报,2001,7(3):329-344.
- [16] 潘志龙,张欢,陈超,等.内蒙古北山敖包呼图仁斑状正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素组成及其地质意义[J].地质科学,2017,52(1):301-316.
- [17] 张金龙,陈超,潘志龙,等.内蒙古北山西林陶勒二断井组的厘定与沉积环境分析[J].地质调查与研究,2017,40(4):274-280.
- [18] 张金龙,潘志龙,陈超,等.内蒙古北山地区三道明水一带早白垩世赤金堡组沉积特征及时代厘定[J].地质调查与研究,2017,40(1):29-34.
- [19] 胡玲,刘俊来,纪沫,等.变形显微构造识别手册[M].北京:地质出版社,2009:1-96.
- [20] 刘俊来,曹淑云,邹运鑫,等.岩石电子背散射衍射 EBSD 组构分析及应用[J].地质通报,2008,27(10):1638-1645.
- [21] 许志琴,王勤,梁风华,等.电子背散射衍射 EBSD 技术在大陆动力学研究中的应用[J].岩石学报,2009,25(7):1721-1736.
- [22] 许志琴,张建新,徐惠芬.中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M].北京:地质出版社,1996:1-294.
- [23] Passchier C W, Trouw R A J. Microtectonics 2ed Edition [M]. Springer-Verlag, Berlin, 2005: 1-289.
- [24] Hirth G, Tullis J. Dislocation creep regimes in quartz aggregates [J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14(2): 145-159.
- [25] Hirth G, Tullis J. The brittle-plastic transition in experimentally deformed quartz aggregates [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1994, 99(B6): 11731-11747.
- [26] Stipp M, Stunitz H, Heilbronner R, et al. The eastern Tonale fault zone: "A natural laboratory" for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C [J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24(12): 1861-1884.
- [27] 袁洪林,吴福元,高山,等.东北地区新生代侵入岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J].科学通报,2003,48(14):1511-1520.
- [28] 王鑫玉,袁超,龙晓平,等.北山造山带尖山和石板井花岗岩年代学、地球化学研究及其地质意义[J].地球化学,2018,47(1):63-78.
- [29] 董洪凯,孟庆涛,张正平,等.内蒙古标山一带石英闪长岩地质特征及构造意义[J].新疆地质,2018,36(4):518-525.
- [30] 修迪,陈超,专少鹏,等.北山石板井地区英云闪长岩-石英闪长岩体锆石 U-Pb 年龄、成因及对古洋盆俯冲作用时限的制约[J].地质通报,2018,37(6):975-986.
- [31] 专少鹏,陈超,申宗义,等.北山地区早古生代洋盆俯冲记录——来自石板井高镁闪长岩的年代学、地球化学证据[J].岩石矿物学杂志,2018,37(4):533-546.
- [32] 王鑫玉.北山公婆泉岛弧岩石组合、岩浆时空演变及其构造意义[D].中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所)博士学位论文,2017.
- [33] 田健,辛后田,滕学建,等.内蒙古北山造山带白云山蛇绿混杂岩的厘定及其对北山洋俯冲消减的指示[J].地质通报,2020,39(9):1436-1447.
- [34] 侯青叶,王忠,刘金宝,等.北山月牙山蛇绿岩地球化学特征及 SHRIMP 定年[J].现代地质,2012,26(5):1008-1018.
- [35] 王怀涛,任文秀,赵洪馨,等.北山地区照壁山南 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义[J].西北地质,2016,49(1):39-49.
- [36] 陈超,滕学建,潘志龙,等.内蒙古北山造山带中段石板井地区 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄及对北山洋闭合时间的限定[J].地质通报,2020,39(9):1448-1460.
- [37] 李舫,王涛,童英,等.北山柳园地区双峰山早泥盆世 A 型花岗岩的确定及构造演化意义[J].岩石矿物学杂志,2009,28(5):407-422.
- [38] 王立社,杨建国,谢春林,等.甘肃北山火山岩哈尔根头口布花岗岩年代学、地球化学及其地质意义[J].地质学报,2009,83(3):377-387.
- ①河北省区域地质矿产调查研究所.内蒙古 1:5 万西林陶勒等四幅区域地质矿产调查报告.2017.
- ②河北省区域地质矿产调查研究所.内蒙古 1:5 万基东等四幅区域地质矿产调查报告.2016.