

# 中国阿尔泰造山带南缘晚古生代花岗岩脉 年代学特征及构造意义

徐 扛<sup>1,2</sup>, 舒 坦<sup>1,2</sup>, 孔令竹<sup>1,2</sup>, 李智勇<sup>1,2</sup>, 汪 晟<sup>1,2</sup>, 蒋映德<sup>1\*</sup>

(1.中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2.中国科学院 大学, 北京 100049)

**摘 要:** 中国阿尔泰造山带南缘晚古生代 A 型花岗岩体被认为是该区域处于伸展构造的重要岩石学证据, 但是现有工作多集中在利用其地球化学特征对大地构造背景的追求, 而对于其构造变形特征却鲜有深入研究。为探索阿尔泰南缘晚古生代花岗岩体产出的大地构造背景, 本文对玛因鄂博岩体、喀拉苏岩体及其围岩开展了详细的野外地质观测和年代学研究。结果显示研究区普遍经历了一期近 S-N 向地壳缩短事件(D<sub>2</sub>), 区域上形成平行于造山带走向的紧闭褶皱(F<sub>2</sub>)和近直立的轴面劈理(S<sub>2</sub>)。玛因鄂博岩体和喀拉苏岩体在野外露头虽没有展示出明显的变形特征, 但是从其衍生的花岗岩脉体展示出与 D<sub>2</sub> 同构造变形特征。对玛因鄂博岩体的两条同构造变形花岗岩脉进行了独居石 U-Pb 测年, 获得其年龄分别为 273±3 Ma、266±2 Ma; 对喀拉苏岩体的一条同构造变形花岗岩脉进行了锆石 U-Pb 测年, 获得其年龄为 282±10 Ma, 均代表了同构造花岗岩脉的形成时代。结合构造观测和定年结果, 表明青河地区和喀拉苏地区在二叠纪早期处于强烈的构造挤压环境。因此, 中国阿尔泰造山带南缘在早-中二叠世仍处于挤压而非伸展的大地构造环境。

**关键词:** 中国阿尔泰; 二叠纪; 同构造花岗岩脉; U-Pb 年代学; 大地构造环境

**中图分类号:** P597; P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2021)03-0444-019

## 0 引 言

增生型造山带是区别于碰撞型造山带的另一种造山作用类型, 它记录了汇聚板块边缘长期且复杂的地体拼贴过程(Sengör et al., 1993; Cawood et al., 2009; 肖文交等, 2019)。汇聚于造山带内部的地质单元实为经历成百上千公里运移的岛弧、海山、洋底高原和大陆碎片等不同地体, 这也是增生型造山带最显著的特征之一(Coney et al., 1980; Schermer et al., 1984)。由于缺乏陆-陆碰撞及深俯冲过程的直接证据, 所以揭示地体汇聚或拼贴过程是研究增生型造

山带造山演化中所面临的重要难题(李继亮, 2004; 肖文交等, 2008)。其中, 如何准确限定增生造山作用时限已成为增生型造山带研究最棘手难题之一(肖文交等, 2019)。在传统的造山作用研究中, A 型花岗岩的出现多被厘定为造山后(post-orogenic)伸展过程的重要岩石学记录(Loiselle and Wones, 1979), 因此其形成时代被认为是厘定造山后时限关键的参考指标之一。特别是, 当 A 型花岗岩侵入拼贴或者在增生地体边界及相邻地体之中时, 它们更是被赋予了特殊的构造学意义, 有学者将其称为钉合岩体(stitching pluton; Jones et al., 1983)。一般来说, A 型

收稿日期: 2020-01-17; 改回日期: 2020-03-20; 网络出版日期: 2020-12-09

项目资助: 国家自然科学基金项目(41672056)和中国科学院国际伙伴计划项目(132744KYSB20190039)联合资助。

第一作者简介: 徐扛(1991-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业。Email: xukang@gig.ac.cn

通信作者: 蒋映德(1982-), 男, 研究员, 主要从事造山带构造变形与变质演化研究。Email: jiangyd@gig.ac.cn

花岗岩往往形成直径数公里未变形的椭球状、圆形侵入体, 显著区别于同造山期强烈变形的侵入体。近 30 年以来, 具 A 型花岗岩特征的钉合岩体在限定造山带碰撞或增生时限方面发挥了重要的作用。例如 Dickinson (2008) 和 Reese et al. (2000) 通过对钉合岩体的研究有效地限定了北美科迪勒拉增生造山事件的时间上限。韩宝福等(2010)通过对北疆主要缝合带之中蛇绿岩及两侧钉合岩体的系统分析, 对该区主要汇聚及增生事件的时限提出了新的认识。同样, 在秦岭-大别造山带(Wang et al., 2015)及江南造山带(Wang et al., 2006a)也有类似研究被广泛报道, 这为限定区域性的拼贴、增生和碰撞事件时间提供了至关重要的制约。

中亚造山带(CAOB)涵盖了西起乌拉尔山, 东至西太平洋, 北起西伯利亚克拉通, 南至华北和塔里木克拉通的广袤区域, 是地球上最大的显生宙增生型造山带, 同时也是同时期全球陆壳生长量最大的地区(Şengör et al., 1993; Şengör and Natal'In, 1996; Jahn et al., 2000; Windley et al., 2007)。有关该造山带中不同地体之间的汇聚过程及整体造山带最终汇聚及碰撞的动力学过程, 至今尚存在较大争议。特别是, 中亚造山带南缘造山作用晚期不同地体的汇聚方式及时间等问题更是关注的焦点, 致使中亚造山带由南天山高压变质带(Gao et al., 1995; Gao and Klemd, 2003; Klemd et al., 2015)至索伦库尔蛇绿岩缝合带(Xiao et al., 2003)自西向东数千公里区域成为 2013 年度国际地球科学领域研究前沿之首(King and Pendlebury, 2013)。作为中亚造山带重要组成部分, 新疆北部的额尔齐斯构造带见证了其北部阿尔泰早古生代活动陆缘增生体系与南部准噶尔中-晚古生代岛弧体系的汇聚过程(曲国胜和张进江, 1991; Li et al., 2017; Jiang et al., 2019), 是中亚造山带内部最受关注的重要构造带之一。

近年来, 针对额尔齐斯构造带两侧的中国阿尔泰及准噶尔地区构造属性及岩浆-变质作用差异等方面研究已取得了诸多进展, 主要观点有, 中国阿尔泰造山带为蒙古微大陆活动大陆边缘庞大增生体系的一部分, 为早古生代增生楔(Long et al., 2007; Sun et al., 2008; Xiao et al., 2009; Cai et al., 2011b; Jiang et al., 2017), 且这一巨型增生楔在泥盆纪经历了强烈的造山作用改造, 形成了大范围的中泥盆世高温变质作用, 并伴随混合岩化、广泛的花岗岩发育及显著的褶皱变形(Wei et al., 2007; Jiang et al., 2010, 2016, 2019; Li et al., 2010, 2016; Cai et al.,

2011b; Zhang et al., 2015; Liu et al., 2020)。而也有学者主张准噶尔地区主要为一套泥盆纪-石炭纪岛弧拼贴体系, 并有少量奥陶纪洋壳残片(简平等, 2003; 肖文交等, 2006; 赵恒乐等, 2012; 刘亚然等, 2016)。张弛和黄萱(1992)依据残留洋壳中堆晶岩岩石组合和地球化学性质将西准噶尔地区的蛇绿岩分为两类(唐巴勒亚类和洪古勒楞亚类), 并主张早古生代残留洋壳形成于扩张洋中脊附近, 而晚古生代蛇绿岩则形成于岛弧和弧后盆地环境中, 代表不成熟的洋壳, 这一时空分布特征指示准噶尔地区由早古生代扩张洋中脊环境到晚古生代陆缘岛弧环境的演化历程(张弛和黄萱, 1992; Wang et al., 2003)。这一看法也得到了相关基性和安山质岛弧岩浆时空分布的佐证(Wang et al., 2003), 指示了早古生代-晚古生代持续的俯冲增生过程(Wang et al., 2003; Long et al., 2012)。

近年来, 阿尔泰与准噶尔的汇聚过程成为学术界关注的焦点, 但在两者汇聚的动力学过程及时限方面仍未能达成共识。一方面, 大量晚石炭世-中二叠世具有 A 型花岗岩地球化学特征的岩体在阿尔泰南缘及额尔齐斯带被识别出来(王涛等, 2005; Liu et al., 2013, 2018b; Tong et al., 2014b; 董增产等, 2019; Zheng et al., 2019), 这些岩体均呈岩株状产出, 近圆形, 出露面积小, 无明显变形特征。一些学者认为这些岩体是阿尔泰与准噶尔汇聚过程中形成的钉合岩体, 即阿尔泰与准噶尔两者之间的拼合发生在这些岩体侵位之前(Liu et al., 2018a; Zheng et al., 2019)。除此之外, 在阿尔泰南缘还发育 290~270 Ma 不连续带状的高温(超高温)低压变质作用及混合岩化作用(Wang et al., 2009, 2014; 全来喜等, 2014; Li et al., 2014; Tong et al., 2014a; Broussolle et al., 2018; Liu et al., 2020), 及相伴生的 290~270 Ma 小规模、不连续的基性岩体或者岩脉(Han et al., 2004; 陈汉林等, 2006; Zhang et al., 2014; Yang et al., 2015; Cai et al., 2016; Broussolle et al., 2018)。这些特征均被认为是代表了阿尔泰南缘晚古生代一期重要的伸展事件, 因此, 诸多学者主张这一事件可能反映了阿尔泰与准噶尔两者汇聚之后的造山后伸展过程(Li et al., 2014; Tong et al., 2014a; Wang et al., 2014; Cai et al., 2016)。然而, 这一观点难以与该区域地质特征相协调。例如, 在额尔齐斯构造带及阿尔泰南缘均显示出平行造山带走向的紧闭褶皱和轴面劈理明显发育的二叠纪构造特征, 以及在部分区域展示出向南逆冲的变形特征(Briggs et al., 2007, 2009; Li et al.,

2015, 2016, 2017; 汪晟等, 2018), 而那些被认为是造山后伸展产物的高温低压变质地体也呈构造挤出特征(Li et al., 2016; Broussolle et al., 2018; Jiang et al., 2019)。这些证据无一例外地说明, 阿尔泰南缘与准噶尔的汇聚过程并非那么单一。因此, 该区域晚古生代构造环境的研究仍有待深入, 其中, 解译该地区晚古生代构造变形的应力学状态则显得至关重要。

本次研究通过详细的野外地质填图及构造观测, 限定阿尔泰南缘典型的 A 型花岗岩岩株(也被认为是钉合岩体)及其围岩的变形特征, 辅以高精度锆石及独居石 U-Pb 定年方法, 综合限定该岩体就位时间-应变关系, 并结合区域地质资料, 探讨阿尔泰-准噶尔汇聚的动力学演化过程。

## 1 区域地质背景

中国阿尔泰造山带位于中国新疆北部, 是阿尔泰造山带在中国境内的延伸部分(图 1)。造山带北部主要出露晚泥盆世-早石炭世低绿片岩相变火山岩和变沉积岩(庄育勋, 1994; Windley et al., 2002)。造山带中部主要为奥陶系哈巴河群浊流沉积岩和火山碎屑岩, 总体为绿片岩相到角闪岩相, 局部达到麻粒岩相(庄育勋, 1994; Wei et al., 2007)。哈巴河群曾被认为是被动陆缘沉积物, 但是最新研究表明其为中奥陶世活动陆缘沉积物(Long et al., 2007, 2008), 代表蒙古巨型增生体系外缘早-中古生代增生楔的重要组成部分(Jiang et al., 2017)。造山带南部主要

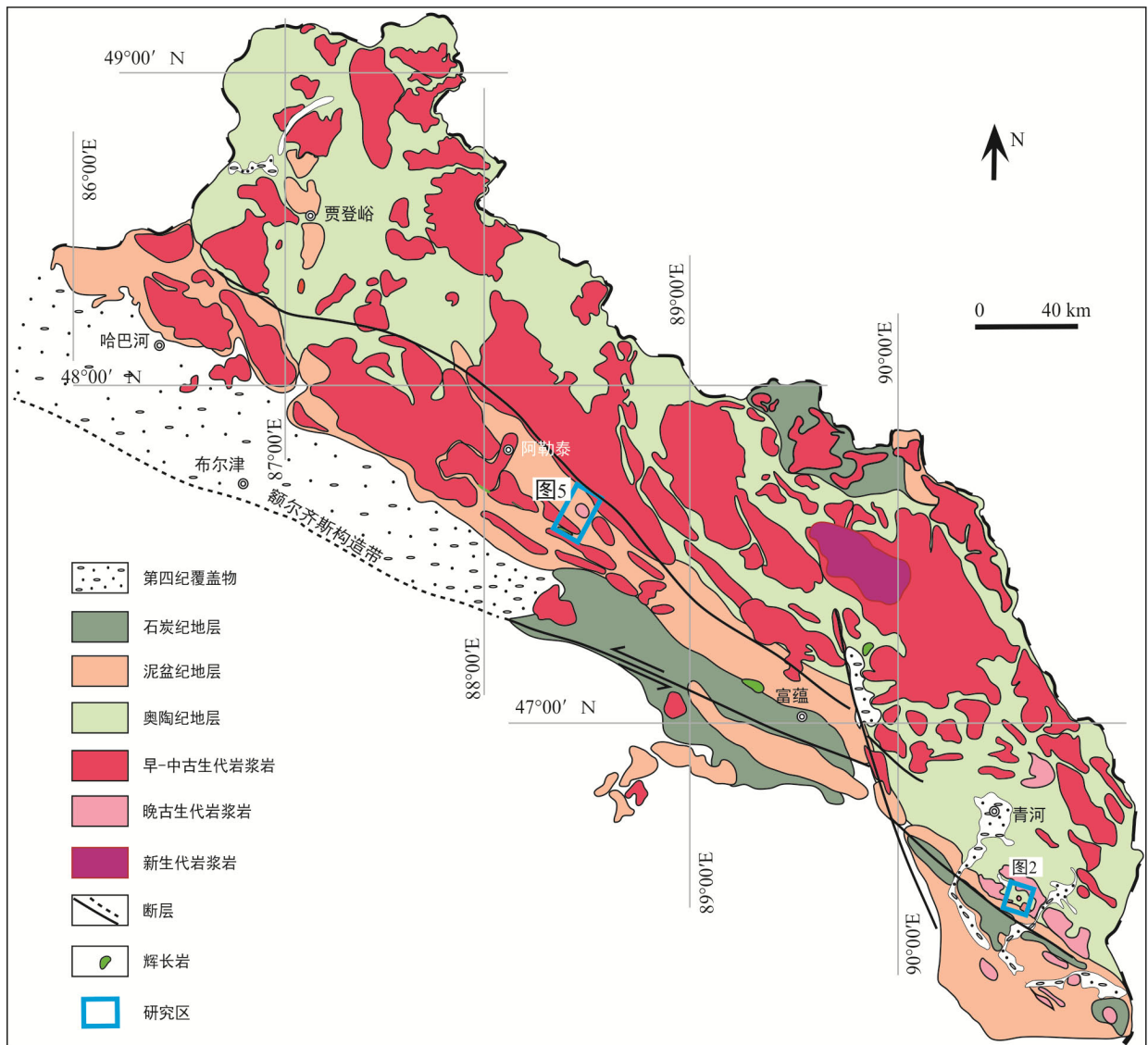


图 1 中国阿尔泰区域地质简图(改编自 Windley et al., 2002)

Fig.1 Simplified geological map of the Chinese Altai

由弱变质的泥盆纪片岩和片麻岩组成, 原岩为火山碎屑岩夹少量的浊流沉积岩和硅质岩(Windley et al., 2002; Long et al., 2007), 其中火山碎屑岩具岛弧相关的地球化学特征(Chai et al., 2009)。造山带南缘则出露强烈变形及变质的片麻岩、糜棱岩(Briggs et al., 2007; Zhang et al., 2012; Li et al., 2015, 2016)。传统观点认为中国阿尔泰造山带自北向南可以分成数个大致平行造山带走向展布的地体单元(Windley et al., 2002; Cai et al., 2011b)。然而, 最新的研究表明先前所划分的不同地体只是代表了不同深度造山带地壳物质的剥露, 这种差异性并不足作为区别不同地体的标准(Broussolle et al., 2019)。

巨量的岩浆岩活动是中国阿尔泰造山带的另一显著特征(Zou et al., 1989)。近年来, 高精度锆石 U-Pb 定年研究揭示中国阿尔泰地区主要有 420~380 Ma 和 280~260 Ma 两期强烈的岩浆活动(Yuan et al., 2007; Sun et al., 2008; Cai et al., 2011a; 董连慧等, 2012; Tong et al., 2014b; Wang et al., 2017)。早期志留纪-泥盆纪花岗岩几乎遍布整体阿尔泰造山带, 它们多具有高钾钙碱性、准铝质至弱过铝质的 I 型花岗岩特点(Yuan et al., 2007; 童英等, 2007; Cai et al., 2011a; Tong et al., 2012; 宋鹏等, 2017)。对于这期 I 型花岗岩的成因仍存有争议, 部分学者认为是岛弧岩浆的产物(Wang et al., 2006b; Yuan et al., 2007; Cai et al., 2011a), 而其他学者则认为该区增生楔杂岩重熔也可以产生在地球化学性质上与之相匹配的岩浆(Jiang et al., 2016; Huang et al., 2020)。晚期二叠纪花岗岩主要出露在造山带的南缘, 它们同样具有高钾钙碱性的地球化学特征, 属于 I 型、A 型或者 I-A 过渡型花岗岩(童英等, 2006; 周刚等, 2009; 高福平等, 2010; Tong et al., 2014b; 董增产等, 2019)。相较而言, 早期的花岗岩占据了阿尔泰近一半的地表填图面积; 而晚期花岗岩则呈圆珠状产出, 出露面积要比早期花岗岩少一个数量级, 且这些岩体变形较弱, 展示出与缝合岩体相似的特征(韩宝福等, 2010), 加之其类似 A 型花岗岩的地球化学特征, 因此常被认为形成于碰撞造山后的拉张构造环境(孙桂华等, 2009; 王涛等, 2010; 董增产等, 2019)。

伴随着上述两期主要岩浆作用, 中国阿尔泰还发育了同期的变质作用。现有研究表明, 早期变质作用为始于与埋深及地壳加厚有关的早泥盆世巴罗型变质作用(Wei et al., 2007; Jiang et al., 2015, 2019), 紧随其后是中泥盆世与地壳伸展减薄相关的高温低

压变质作用。变质地温梯度的显著变化, 暗示着异常高的热量涌入, 这一现象被解释为洋中脊俯冲(Sun et al., 2009; Cai et al., 2010, 2011a; Jiang et al., 2010)或者岩石圈地幔减薄(Jiang et al., 2019)导致热的软流圈上涌所致。晚期变质作用主要是早二叠世高温低压变质作用, 局部区域可以达麻粒岩相; 岩石学观察结果显示其典型的矿物组合为石榴石+斜方辉石+矽线石+堇青石+尖晶石+黑云母+斜长石+石英, 相对应的温压条件为 960 °C/0.80 GPa(Tong et al., 2014a)。

## 2 研究区地质特征

本次研究主要对距青河县城南东 30 km 的玛因鄂博花岗岩岩体、阿勒泰县城南东 20 km 处的喀拉苏花岗岩岩体及其围岩的变形特征开展了详细的野外地质观测和分析。主要地质特征描述如下。

### 2.1 玛因鄂博岩体

玛因鄂博花岗岩体位于青河县城东南克孜赛村附近(图 1)。该区域北部主要出露奥陶系哈巴河群, 南部则为泥盆系玛因鄂博组(图 2)。奥陶系哈巴河群主要由变质程度较高的片麻岩组成。早期片麻理  $S_1$  发生强烈褶皱变形, 褶皱轴迹往南东方向倾伏, 角度平缓至中等。伴随早期面理的褶皱变形, 新近直立的透入性面理  $S_2$  广泛发育, 并与第二期褶皱轴面劈理相平行(图 2b、3a); 局部保留的早期面理受到晚期构造改造形成水平褶皱(图 3b)。南部泥盆系玛因鄂博组发育一组平行于原始沉积层理( $S_0$ )的近水平变质面理( $S_1$ ), 该期变质面理经历了近 S-N 向构造挤压, 发育一系列枢纽近水平、走向 NW-SE 的直立褶皱(图 3c), 局部发育近直立的轴面劈理(图 3d)。即, 受到晚期( $D_2$ )挤压作用的影响, 早期  $S_1$  面理分别在强、弱变形域发育紧闭和宽缓褶皱  $F_2$ 。

花岗岩在该区域广泛出露, 呈圆柱状产出, 形成时代为 305~260 Ma(周刚等, 2007; Song et al., 2019; 图 4a)。地球化学研究表明, 花岗岩为低硅、高钾、高钠, 普遍具 A 型花岗岩属性, 属于典型的后碰撞花岗岩(童英等, 2006; 周刚等, 2009; 董增产等, 2019)。野外露头上, 这些花岗岩均未表现出明显变形特征(图 4b), 但从这些岩体中衍生出众多长达数百米至上千米的花岗岩脉体(图 4c)切穿围岩中主要面理, 并受挤压作用发生了显著的褶皱变形; 显微岩相观测发现脉体中的石英具显著波状消光特征(图 4d、e)。通过构造恢复可知, 这些岩脉在变形

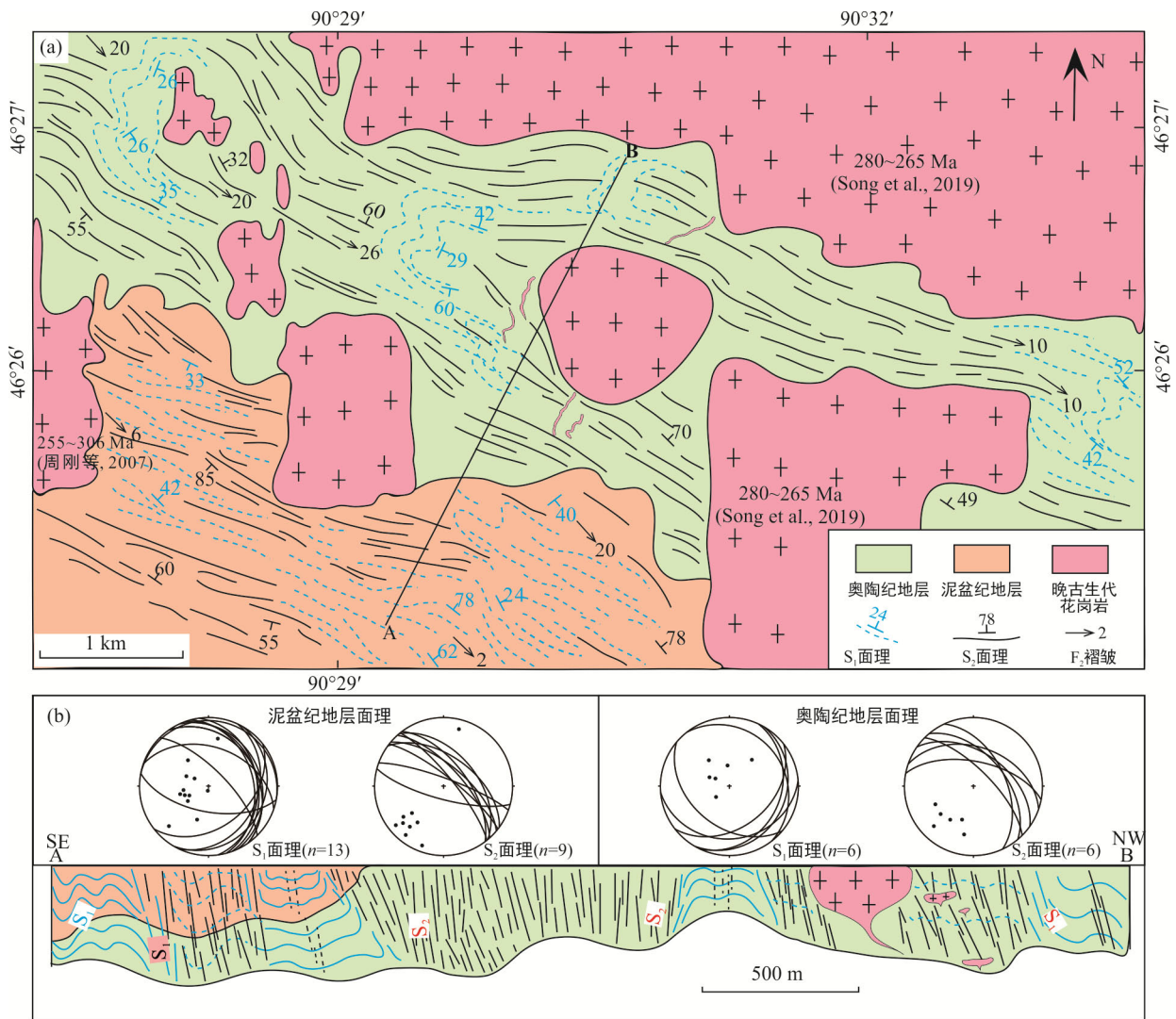


图 2 青河地区地质简图以及花岗岩脉变形特征(改自新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)

Fig.2 Simplified geological map of the Qinghe area showing the structural characteristics of the Mayinebo pluton, the deformed granite veins and surrounding strata

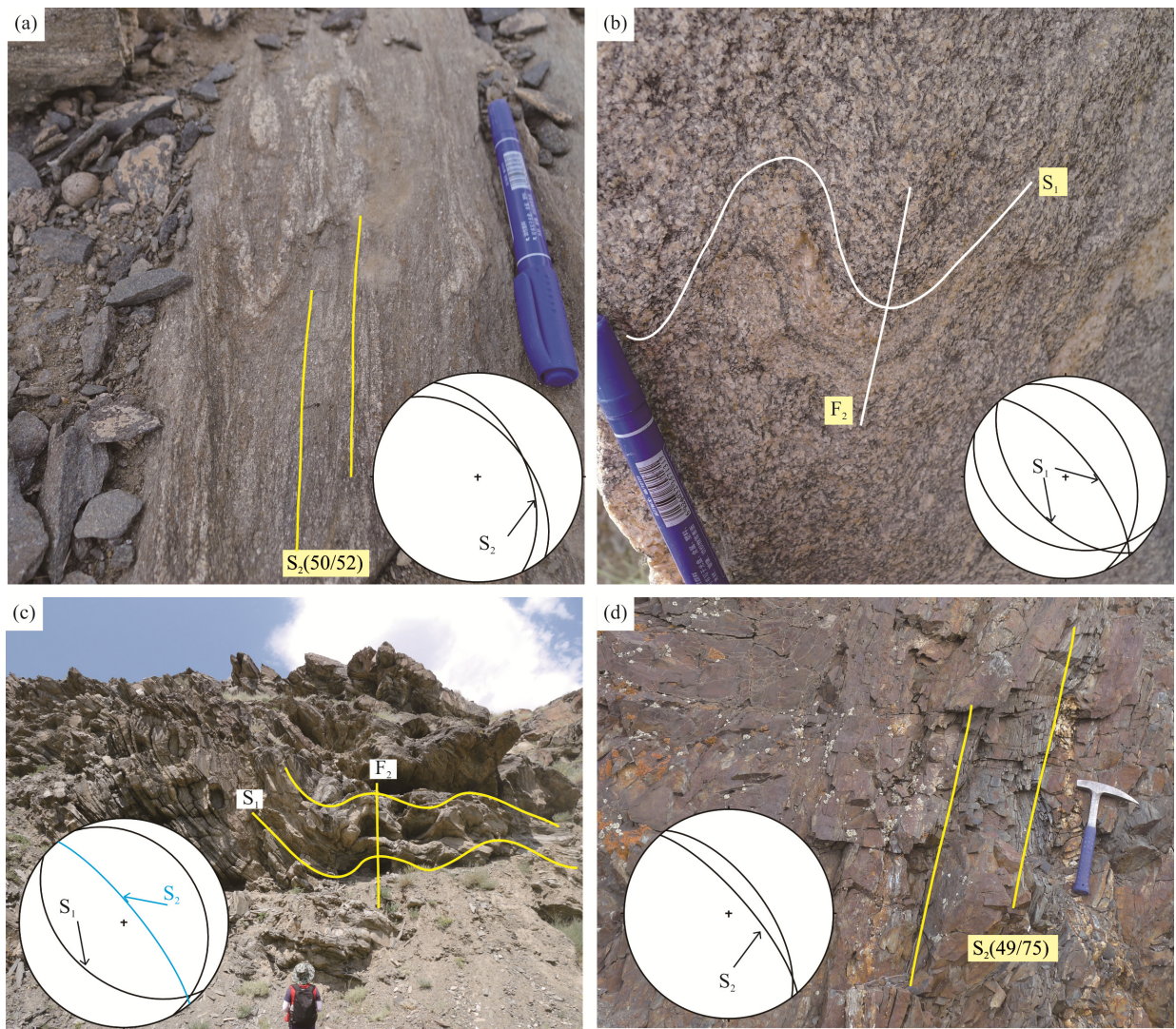
之前均为近 S-N 向展布, 与区域性的晚期面理近乎呈正交关系, 暗示了它们就位于与晚期近 S-N 向挤压相关的张性裂隙之中, 随后在晚期变形中进一步褶皱弯曲。

## 2.2 喀拉苏岩体

喀拉苏花岗岩体位于阿勒泰市东南喀拉苏村一带(图 1)。该区域北部为哈巴河群变沉积地层, 并发育有大量泥盆纪花岗岩, 其形成年龄在 410~396 Ma 之间(Yang et al., 2011; Broussolle et al., 2018)。该区域南部主要出露早泥盆世岛弧火山沉积以及中泥盆世的海相碎屑沉积岩序列, 局部夹有哈巴河群高级变质岩石(Cai et al., 2011a; Broussolle et al., 2018)(图 5)。

泥盆纪地层变质程度从低绿片岩相至麻粒岩相

不等。在麻粒岩相变质岩中, 既有年代约为 390 Ma 变质锆石(Long et al., 2007; Jiang et al., 2010), 也有 292~271 Ma 变质锆石报道(Wang et al., 2009; Tong et al., 2014a), 指示该区可能经历了多期变质事件的叠加(Broussolle et al., 2018)。相应的, 构造变形也展示出多期次的特征。野外可见普遍发育的早期高角度变质面理( $S_1$ ), 且多平行于成分层理( $S_1//S_0$ )。前人研究表明, 早期  $S_1$  变质面理包含典型的巴罗型变质矿物, 可能记录了该区早期地壳不断加厚的过程(Broussolle et al., 2018), 且这期变质面理受晚期近 S-N 向  $D_2$  构造挤压不均匀改造, 形成强弱变形域。因此, 在强变形域内发育紧闭褶皱及近 E-W 走向的新一期近直立面理( $S_2$ ; 图 6a、b), 而在弱变形域则以宽缓褶皱为特征, 且保留了早期面理的痕迹(图 6c、d)。



(a) 奥陶纪片麻岩中透入性的  $S_2$  面理; (b) 奥陶纪片麻岩中保存的早期面理( $S_1$ )发生褶皱; (c) 泥盆纪低级变质岩中  $D_2$  弱变形域发育枢纽近水平的  $F_2$  宽缓褶皱(近水平的  $S_1$  面理在  $F_2$  褶皱翼部被旋转到近直立位置, 并与区域  $S_2$  面理近平行); (d) 泥盆纪地层中  $D_2$  强变形域发育的近直立的 NW-SE 走向的  $S_2$  面理。

图 3 玛因鄂博岩体围岩变形特征

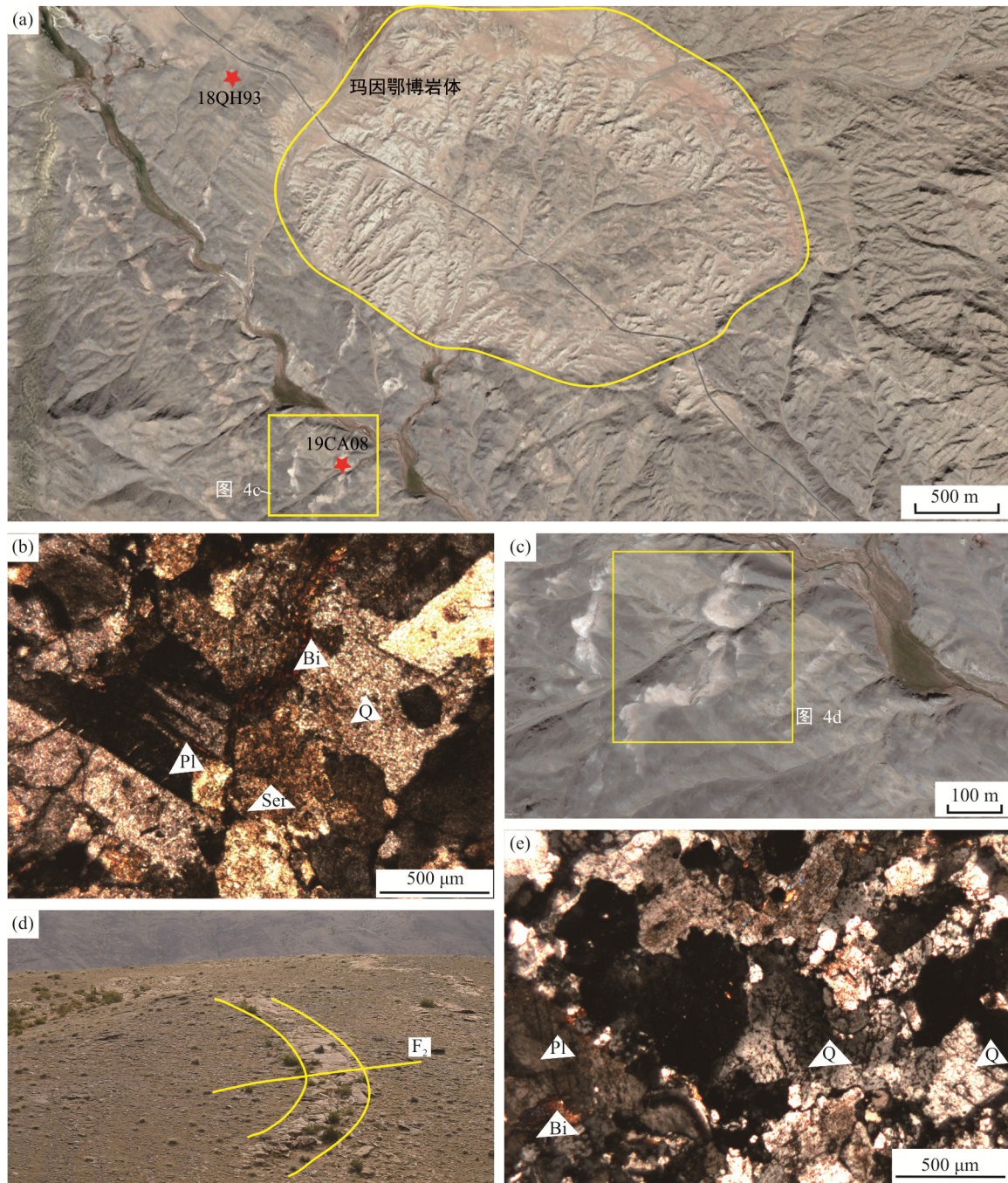
Fig.3 Deformation characteristics of the rocks surrounding the Mayinebo pluton

早古生代花岗岩体经历了强烈的剪切变形而形成花岗质糜棱岩, 而晚古生代花岗岩则很少变形。晚古生代喀拉苏花岗岩体主要就位于南部泥盆纪变质地层之中, 岩体呈近圆珠形产出, 直径大约 4 km (图 7a), 且在露头尺度上, 基本没有展示出任何变形特征(图 7b)。相反, 从岩体中所衍生出的花岗岩脉体则切穿了围岩中主要的面理, 并与之成正交关系, 随后发生褶皱变形(图 7c), 应变特征与围岩中晚期变形特征相一致。这些变形特征也说明了花岗岩脉很可能是在第二期变形( $D_2$ )的某个阶段侵入于平行挤压方向的张性裂隙之中, 并进一步经受了晚期构造变形的改造, 即, 这些花岗岩脉为同构造挤

压背景下的产物。

### 3 分析测试方法

为了限定第二期变形( $D_2$ )的时代, 我们采集变形花岗岩岩脉样品进行锆石和独居石 U-Pb 同位素年代学分析。样品经击碎、磨细、过筛后, 以重液集中重矿物等一系列工序后, 分选出独居石和锆石。然后将独居石和锆石制成环氧树脂靶, 并进行打磨和抛光, 其后进行反射光、透射光、背散射(BSE)和阴极发光(CL)拍照。最后, 根据显微照片、背散射以及阴极发光图像选择适合 U-Pb 定年位置。



(a) 玛因鄂博岩体以及样品位置(卫星图); (b) 显微镜下, 岩体中矿物颗粒未变形(正交偏光,  $\times 5$  物镜); (c) 花岗岩脉体发生褶皱变形(卫星图); (d) 花岗岩脉体发生褶皱变形; (e) 显微镜下, 花岗岩脉体中石英因发生变形而产生波状消光(单偏光,  $\times 5$  物镜)。矿物代号: Q. 石英; Pl. 斜长石; Ser. 绢云母; Bi. 黑云母。

图 4 玛因鄂博岩体及其脉体野外特征、岩石显微镜下特征以及采样位置

Fig.4 Macro- to micro-structural features of the Mayinebo pluton and its associated granite veins, and locations of geochronological samples

独居石和锆石 U-Pb 同位素定年在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 分析完成。该套实验装置配置有 GeoLas 2005 激光剥蚀系统(LA)并与 Agilent 7500a 质谱仪(ICP-MS)联用。独居石剥蚀实验选取的激光束斑大小均为  $16 \mu\text{m}$ ; 锆石剥蚀

实验选取的激光束斑大小均为  $32 \mu\text{m}$ 。分析过程中, 锆石样品靶每个样点的背景采集时间为  $20 \text{ s}$ , 信号采集时间为  $65 \text{ s}$ 。每测定 5 次未知样品点, 测定 2 次锆石标样 91500, 用来校正 U-Pb、Th-Pb 同位素分馏和仪器质量歧视。独居石样品测试流程与之相同,

但是采用标样为独居石 44069(Aleinikoff et al., 2006)。原始数据处理采用 ICPMSDataCal 9.0 软件(Liu et al., 2009), 年龄谐和图的绘制采用 ISOPLOT 3.2(Ludwig, 2001)软件。测试结果见表 1。

## 4 结果和讨论

### 4.1 测试结果

#### 4.1.1 玛因鄂博岩体变形花岗岩脉

进行独居石定年的样品 18QH93 和 19CA08 分别采自玛因鄂博岩体中所衍生出的两条变形花岗岩脉体(采样位置见图 4)。样品 18QH93 中的独居石呈灰棕色, 透明, 自形粒状, 粒度在 60~120  $\mu\text{m}$  之间, 背散射 BSE 图像显示出环带特征(图 8a)。该样品中 20 个独居石颗粒 U-Pb 定年得到  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄范围在 291~265 Ma 之间, 加权平均年龄为  $273\pm 3$  Ma (MSWD=2.0; 图 8a)。

样品 19CA08 中的独居石颗粒略小, 直径在 30~60  $\mu\text{m}$  之间。其形态特征与样品 18QH93 中独居石颗粒相似, 背散射图像同样呈现出环带特征, 个别颗粒包含有较多的包裹体(图 8b)。该样品中包裹体较少的独居石定年中 19 个有效点给出的

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 274~256 Ma, 加权平均年龄为  $266\pm 2$  Ma(MSWD=3.4; 图 8b)。

#### 4.1.2 喀拉苏岩体变形花岗岩脉

样品 19CA62 采自喀拉苏岩体中的脉体, 该样品中锆石大多是透明的, 自形粒状, 大小大多在 50~100  $\mu\text{m}$  之间, 长宽比为 1:1~2:1。阴极发光图像显示这些锆石具有典型的岩浆锆石的环带特征(图 8c)。该样品获得的 16 个有效数据点中, 给出了早中泥盆世的年龄(419~377 Ma), 加权平均值为  $397\pm 7$  Ma(MSWD=7.8; 图 8c), 可能代表了源区继承锆石的年龄; 另 5 颗锆石给出了相近的晚古生代的年龄(288~261 Ma), 加权平均值为  $282\pm 10$  Ma (MSWD=6.2; 图 8c), 代表了岩体的结晶年龄; 与 Lin et al., (2019)研究结果一致。综上, 喀拉苏变形脉体的形成时代可以限定为~282 Ma。

### 4.2 讨论

由于花岗岩记录了大陆形成演化的各种信息而成为研究大陆形成演化的重要载体(翟明国等, 2016), 在多年研究的基础上, 发展形成的花岗岩大地构造更是将花岗岩形成和侵位的物理特性、花岗岩体变形改造、花岗岩物源、巨型花岗岩带发育等与大地构造演化过程之间的相互耦合关系作为研究的

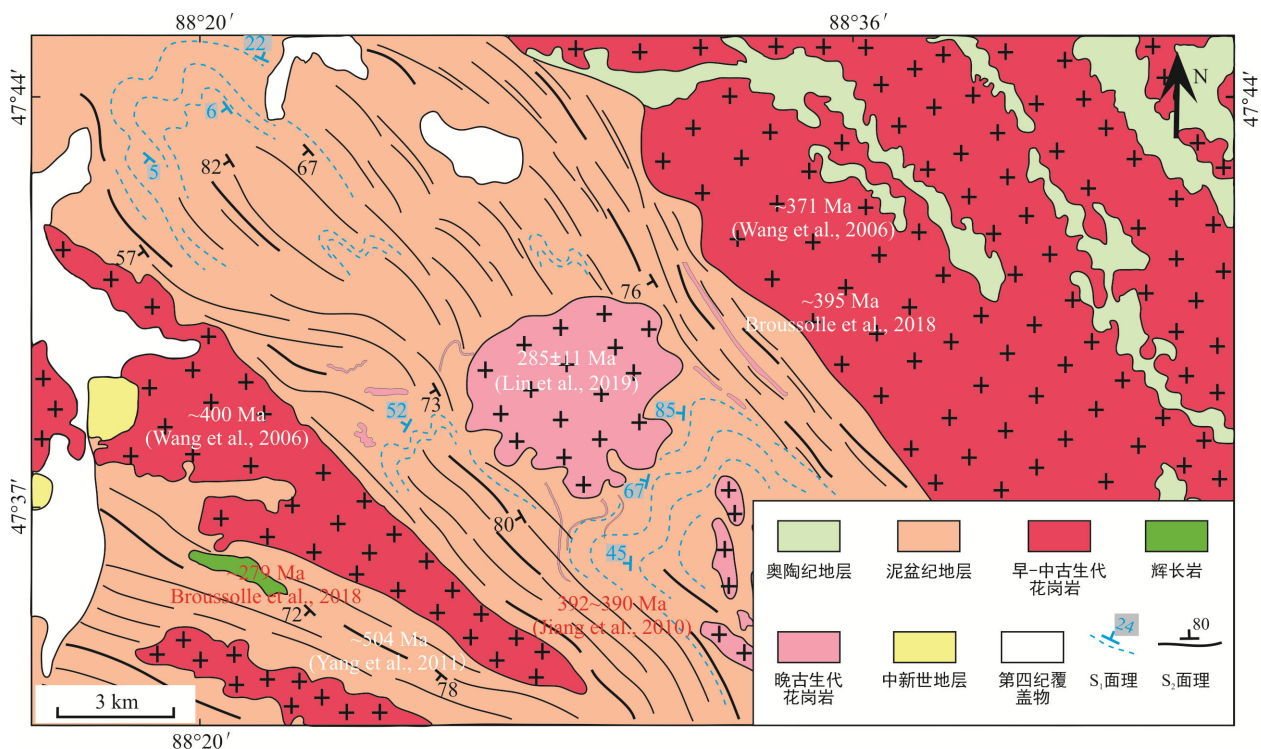


图 5 喀拉苏地区地质简图以及花岗岩脉变形特征(改自新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)

Fig.5 Simplified geological map of the Kalasu area showing the structural characteristics of the pluton, deformed granite veins and its surrounding strata



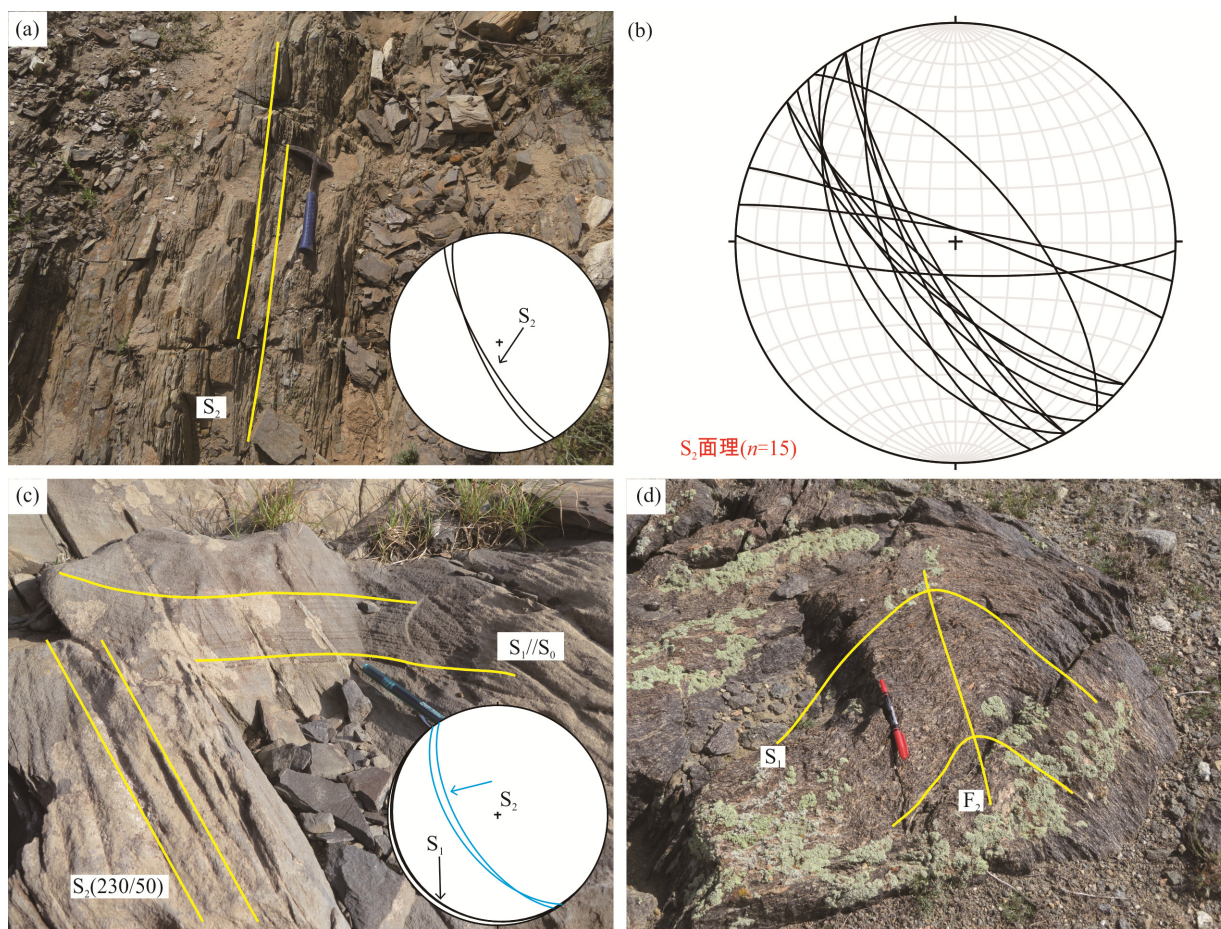


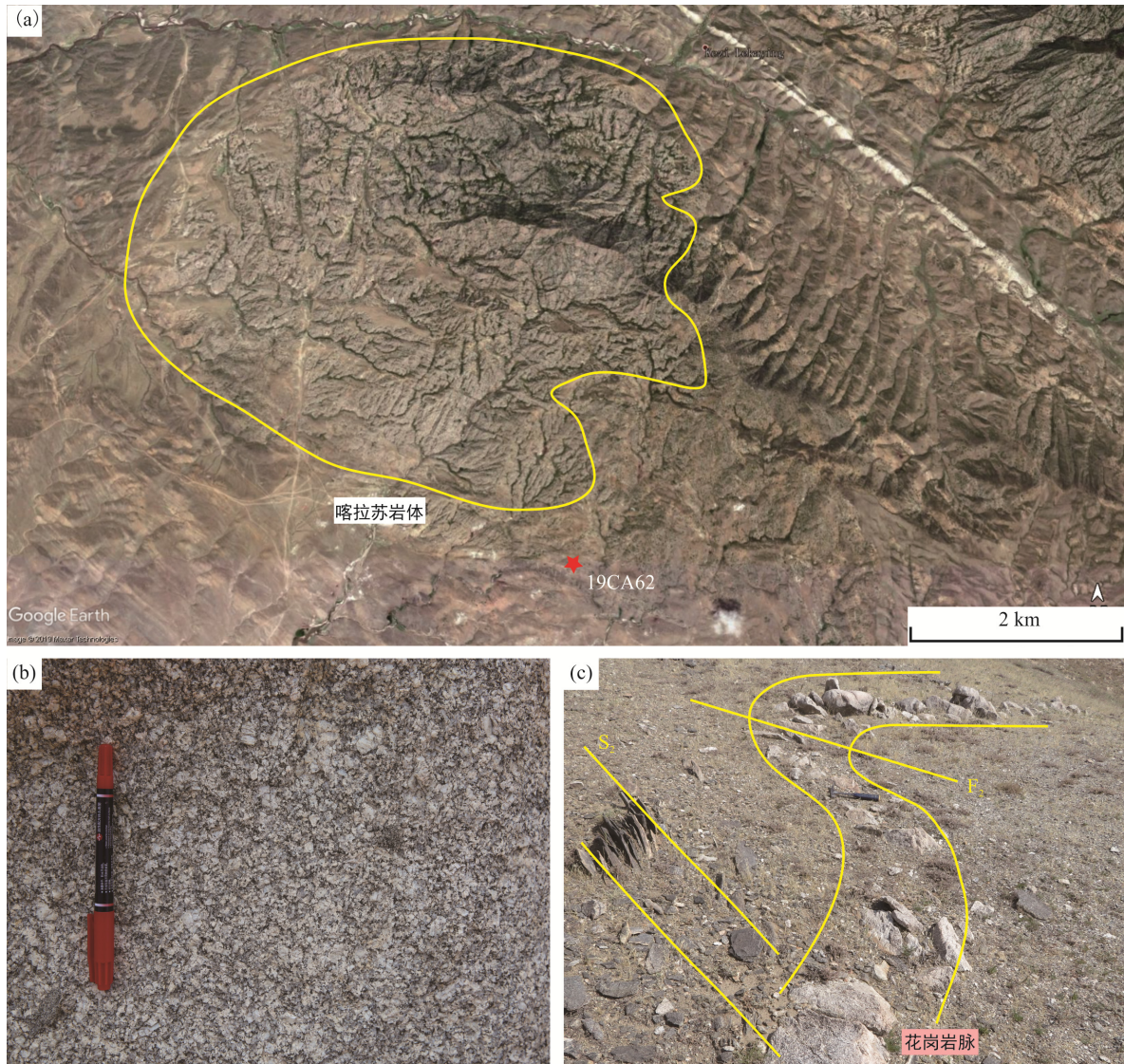
图 6 喀拉苏围岩受  $D_2$  期构造叠加发生不均匀变形  
 Fig.6 Deformation characteristics of the rocks surrounding the Kalasu granite intrusion

主要内容(王涛等, 2017)。在岩体、变形和大地构造演化相关联的重要的研究实例中, 钉合岩体曾被用来限定缝合带最终形成时代(韩宝福等, 2010)。

在中国阿尔泰造山带南缘, 发育了单个面积较小、数量众多、具有一定规律排列的圆形/卵形花岗岩株。这些岩体普遍具有高  $SiO_2$ 、 $Na_2O+K_2O$ 、 $Fe/Mg$ 、 $Ga/Al$ 、 $Zr$ 、 $Nb$ 、 $Ga$ 、 $Y$ 、 $Ce$  含量以及低的  $CaO$ 、 $Sr$  含量, 与典型意义上 A 型花岗岩(Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987)类似。虽然此类岩石多分布于阿尔泰南缘的额尔齐斯构造带, 但是在与之毗邻的准噶尔地体北侧也偶有出现, 因此, 它们多被认为是阿尔泰与准噶尔拼贴后侵位的钉合岩体(Liu et al., 2018a; Zheng et al., 2019)。基于 A 型花岗岩的地球化学特征, 学者们主张其产出于碰撞后板内伸展环境(王涛等, 2005; 童英等, 2006; 孙桂华等, 2009; Liu et al., 2018b; 董增产等, 2019)。然而, 这种

依靠花岗岩地球化学特性来限定大地构造背景的方法仍面临挑战。例如, 在阿尔泰南缘同时期侵入岩类却又展示出与俯冲带岛弧相关的地球化学特征(Wan et al., 2013), 暗示大洋俯冲仍在继续。

研究区内, 两个不同岩体的围岩都经历了强烈变形, 并伴随形成了一期 NWW-SEE 走向为主的近直立轴面劈理  $S_2$ , 指示晚期  $D_2$  变形主要受控于 SSW-NNE 向构造挤压作用。虽然岩体本身没有展示出明显的变形特征, 但是由其衍生出来的岩脉却经历了一定程度的褶皱变形, 且变形特征与围岩中晚期变形特征相一致, 揭示了其亦可能受到 SSW-NNE 方向的构造挤压。此外, 根据这些岩脉的变形特征, 不难得出其就位时近正交切穿区域中晚期 NWW-SEE 走向面理, 其延伸方向几乎平行于晚期挤压时的最大应力方向, 所以这些岩脉很可能是以被动就位方式侵入于该期变形形成的张性裂隙之中。



(a) 喀拉苏岩体以及样品位置(卫星图); (b) 喀拉苏花岗岩体未发生变形; (c) 花岗岩脉体发生显著褶皱变形。

图 7 喀拉苏岩体及其脉体野外变形特征以及采样位置

Fig.7 Macro- to micro-structural features of the Kalasu pluton and its associated granite veins, and locations of geochronological samples

表 1 独居石和锆石的 LA-ICP-MS 年龄数据

Table 1 U-Pb isotopic results for monazite and zircon from the granite veins

点号	含量(μg/g)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
	Th	U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ
18QH93(46°25'57"N, 90°30'29"E), 独居石													
1	69000	1919	36.0	0.05201	0.00201	0.31069	0.01137	0.04357	0.00055	274	3	274	9
2	50395	458	110.0	0.05614	0.00319	0.33521	0.01779	0.04401	0.00073	277	5	293	14
3	63899	1306	48.9	0.05318	0.00209	0.32201	0.01276	0.04373	0.00056	275	3	283	10
4	47895	846	56.6	0.05386	0.00289	0.32044	0.01545	0.04381	0.00054	276	3	282	12
5	65690	767	85.7	0.05317	0.00239	0.32028	0.01513	0.04372	0.00057	275	4	282	12
6	73799	3105	23.8	0.05250	0.00140	0.30778	0.00752	0.04267	0.00043	269	3	272	6
7	62626	865	72.4	0.04991	0.00271	0.30450	0.01646	0.04424	0.00058	279	4	269	13
8	36890	709	52.0	0.05201	0.00255	0.30625	0.01373	0.04271	0.00059	269	4	274	11

续表 1:

点号	含量( $\mu\text{g/g}$ )		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$
18QH93(46°25'57"N, 90°30'29"E), 独居石													
9	68844	1805	38.1	0.05282	0.00162	0.31061	0.00970	0.04259	0.00047	268	3	274	8
10	72492	503	144.1	0.05564	0.00330	0.33278	0.01980	0.04399	0.00075	277	5	291	15
11	31657	3550	8.9	0.05159	0.00138	0.30555	0.00800	0.04293	0.00043	270	3	270	6
12	64100	944	67.9	0.05353	0.00242	0.31186	0.01393	0.04242	0.00060	267	4	275	11
13	50834	439	115.8	0.05988	0.00348	0.36023	0.02049	0.04400	0.00082	277	5	312	15
14	52701	1558	33.8	0.05577	0.00196	0.35521	0.01281	0.04626	0.00067	291	4	308	10
15	57259	683	83.8	0.05859	0.00323	0.34487	0.01878	0.04290	0.00058	270	4	300	14
16	51911	427	121.6	0.06334	0.00400	0.36992	0.02193	0.04343	0.00079	274	5	319	16
17	65059	735	88.5	0.05320	0.00256	0.30803	0.01452	0.04240	0.00063	267	4	272	11
18	60191	465	129.4	0.05445	0.00318	0.31618	0.01783	0.04235	0.00076	267	5	278	14
19	69980	668	104.8	0.05619	0.00350	0.33208	0.01952	0.04365	0.00073	275	5	291	15
20	53141	5032	10.6	0.05290	0.00144	0.30636	0.00789	0.04198	0.00043	265	3	271	6
19CA08(46°25'03"N, 90°30'57"E), 独居石													
1	87744	12466	7.0	0.05170	0.00111	0.30322	0.00642	0.04239	0.00036	267	2	268	5
3	53636	1805	29.7	0.05465	0.00224	0.32048	0.01233	0.04271	0.00044	269	3	282	9
4	93744	3699	25.3	0.05481	0.00172	0.31467	0.00975	0.04151	0.00037	262	2	277	8
5	111143	23339	4.8	0.05115	0.00113	0.29577	0.00650	0.04178	0.00031	263	2	263	5
7	111969	16723	6.7	0.05255	0.00100	0.30444	0.00570	0.04189	0.00031	264	2	269	4
8	93955	21058	4.5	0.05123	0.00088	0.30111	0.00536	0.04246	0.00030	268	2	267	4
9	58006	3714	15.6	0.05070	0.00143	0.28303	0.00819	0.04055	0.00052	256	3	253	6
10	63828	3095	20.6	0.05646	0.00179	0.33818	0.01008	0.04350	0.00038	274	2	295	8
11	45259	5368	8.4	0.05183	0.00139	0.29624	0.00769	0.04139	0.00034	261	2	263	6
12	95416	13998	6.8	0.05141	0.00091	0.30085	0.00524	0.04229	0.00028	267	2	267	4
14	58811	3754	15.7	0.05375	0.00153	0.31605	0.00882	0.04248	0.00035	268	2	278	7
15	83089	9556	8.7	0.05113	0.00102	0.30633	0.00615	0.04319	0.00038	272	2	271	5
16	95412	18131	5.3	0.05238	0.00109	0.29857	0.00564	0.04112	0.00031	259	2	265	4
17	102227	13282	7.7	0.05143	0.00112	0.30100	0.00616	0.04219	0.00033	266	2	267	5
18	59031	5312	11.1	0.05029	0.00118	0.29487	0.00678	0.04226	0.00033	266	2	262	5
19	39394	3120	12.6	0.05070	0.00152	0.30148	0.00923	0.04290	0.00039	270	2	267	7
20	106094	15692	6.8	0.05115	0.00087	0.30064	0.00524	0.04237	0.00030	267	2	266	4
21	82610	18150	4.6	0.05058	0.00099	0.29560	0.00554	0.04224	0.00030	266	2	262	4
24	84195	11429	7.4	0.05247	0.00109	0.31148	0.00664	0.04298	0.00040	271	2	275	5
19CA62(47°37'11"N, 88°30'12"E), 锆石													
1	414	577	0.7	0.05721	0.00267	0.48402	0.02254	0.06118	0.00077	382	5	400	15
2	738	1981	0.4	0.05397	0.00157	0.32686	0.00941	0.04386	0.00046	276	3	287	7
3	436	439	1.0	0.06098	0.00353	0.50743	0.02867	0.04357	0.00085	378	5	416	19
4	493	608	0.8	0.05785	0.00236	0.51447	0.01821	0.06525	0.00082	407	5	421	12
6	315	461	0.7	0.06144	0.00299	0.54839	0.02631	0.06474	0.00089	404	5	443	17
7	1	342	0.0	0.05637	0.00447	0.31392	0.02406	0.04136	0.00084	261	5	277	19
8	254	510	0.5	0.06197	0.00296	0.53062	0.02319	0.06260	0.00102	391	6	432	15
9	337	487	0.7	0.05755	0.00303	0.47621	0.02335	0.06092	0.00126	381	8	395	16
10	572	656	0.9	0.05610	0.00212	0.46838	0.01811	0.06026	0.00066	377	4	390	13
11	531	696	0.8	0.05654	0.00220	0.48729	0.01813	0.06275	0.00068	392	4	403	12

续表 1:

点号	含量(μg/g)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
19CA62(47°37'11"N, 88°30'12"E), 锆石													
12	616	675	0.9	0.06861	0.00359	0.62699	0.03044	0.06639	0.00081	414	5	494	19
14	196	255	0.8	0.06810	0.00412	0.57159	0.03174	0.06173	0.00099	386	6	459	21
15	229	376	0.6	0.05604	0.00272	0.48893	0.02342	0.06312	0.00079	394	5	404	16
16	343	386	0.9	0.05684	0.00262	0.53052	0.02490	0.06730	0.00078	419	5	432	17
17	315	510	0.6	0.05963	0.00256	0.53677	0.02154	0.06568	0.00088	410	5	436	14
18	709	921	0.8	0.05697	0.00202	0.51082	0.01729	0.06487	0.00067	405	4	419	12
20	169	297	0.6	0.05562	0.00276	0.47237	0.02284	0.06196	0.00080	387	5	392	16
22	293	719	0.4	0.05475	0.00227	0.34047	0.01342	0.04506	0.00050	284	3	297	10
23	537	1133	0.5	0.05071	0.00172	0.32056	0.01069	0.04570	0.00047	288	3	282	8
24	381	3490	0.1	0.05571	0.00146	0.34873	0.00908	0.04523	0.00052	285	3	303	7
25	212	370	0.6	0.05902	0.00299	0.53269	0.02606	0.06547	0.00080	408	5	433	17

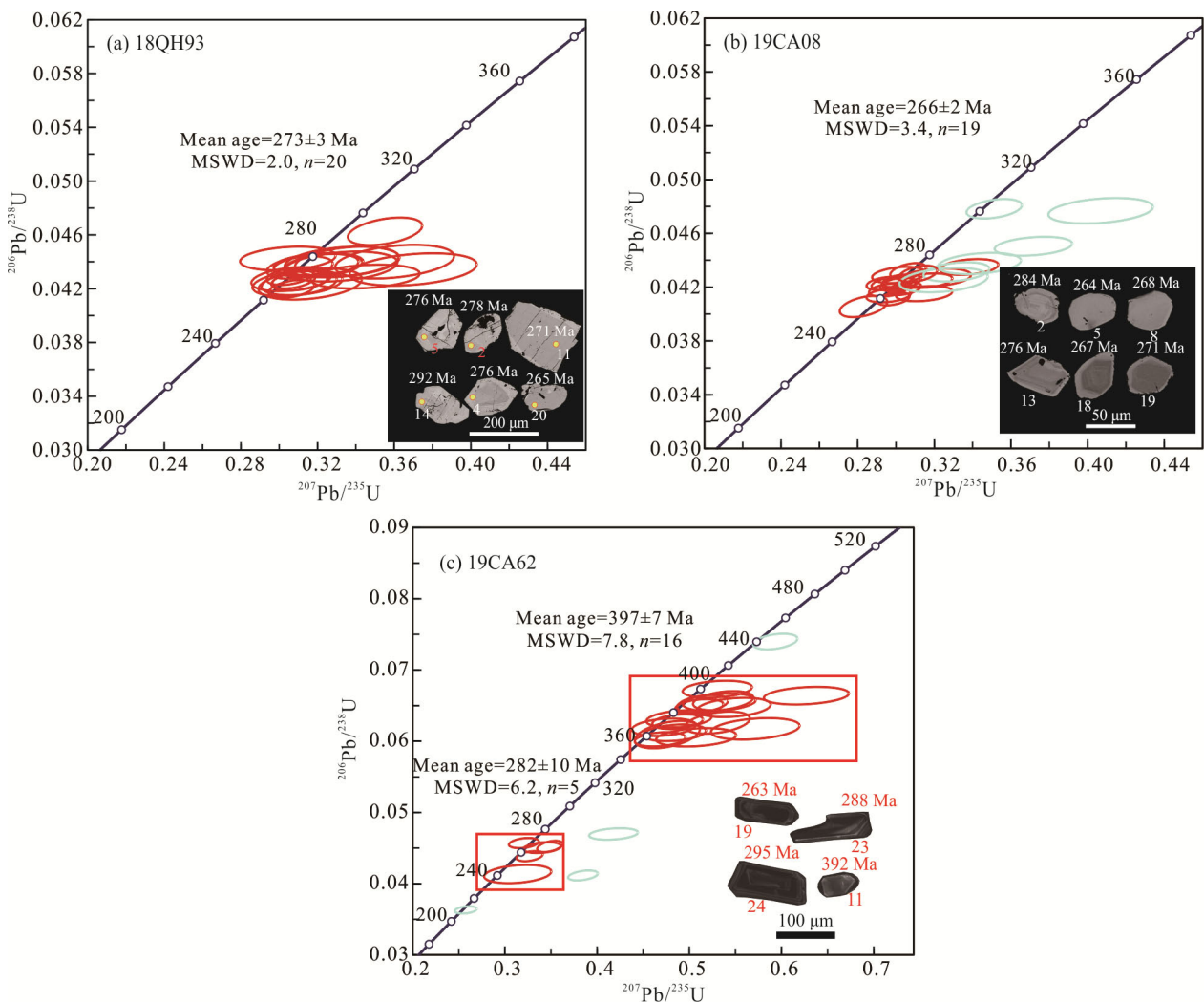


图 8 独居石和锆石 U-Pb 谐和曲线图及背散射(BSE)和阴极发光(CL)照片  
 Fig.8 Monazite and zircon U-Pb concordia diagrams

也就是, 这些岩脉不仅经历了晚期变形的叠加, 且与该期挤压构造同期就位。而其所对应的岩体没有明显的变形特征, 有可能暗示这些岩体就位深度非常浅(相应的变形温度比较低), 其就位机制类似于受浮力驱动的主动就位方式(Hut D 和刘永江, 1991), 以至于在同等应力下, 它们与岩脉展示出完全不同的应变特征。因此, 这些圆形、卵形岩体可能是浮力驱动下的主动就位, 而脉体则是在区域性挤压作

用与岩体主动就位过程中产生裂隙时侵入的, 属于被动就位方式。综上所述, 这些岩脉的年龄(282~266 Ma)可以用来制约晚期构造挤压的时代, 即, 上述两个研究区在此期间能很可能仍受近 S-N 向构造挤压作用。

纵观中国阿尔泰山南缘, 与挤压构造相伴生的紧闭褶皱及南向逆冲等特征沿造山带走向方向广泛发育(图 9)。而那些被普遍认为是碰撞后伸展的高温

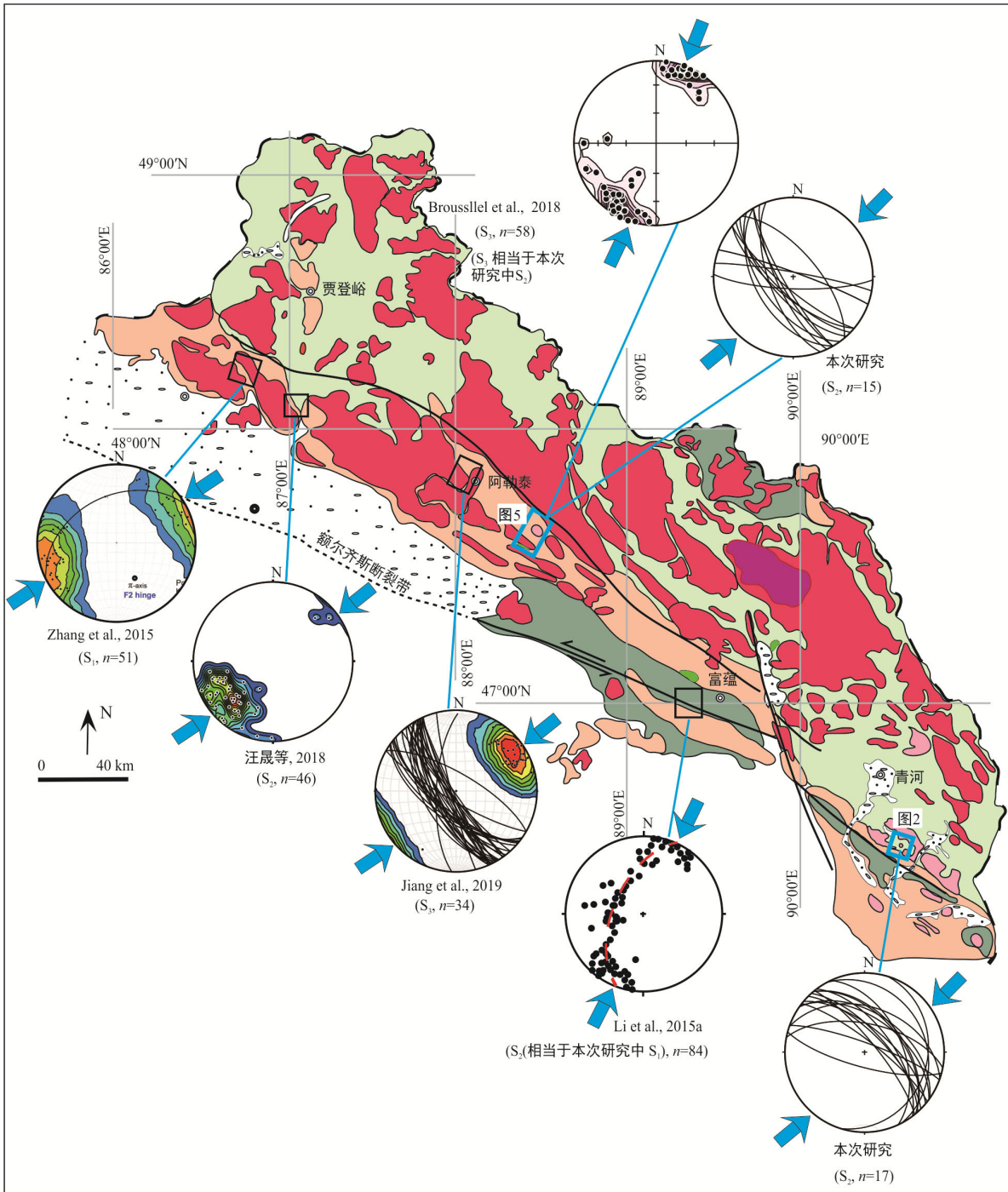


图 9 中国阿尔泰山南缘变形特征(图例见图 1)

Fig.9 Overall structural features along the southern Chinese Altai

变质体,亦展示出受近 S-N 向构造挤压而发生强烈构造挤出的特征,在局部地区甚至形成约 280 Ma 的混合岩-花岗岩穹窿(Broussolle et al., 2018)。近期的研究表明,这期构造变形与阿尔泰-准噶尔近 S-N 向汇聚密切相关(Li et al., 2017; Jiang et al., 2019)。因此,这些地质事实不约而同地指示中国阿尔泰造山带南部在早-中二叠世仍处于强烈的构造挤压环境,也暗示着阿尔泰与准噶尔的汇聚过程至少在该时期仍未演化到碰撞后伸展的阶段。

## 5 结 论

(1) 晚古生代中国阿尔泰造山带南缘青河地区和喀拉苏地区普遍经历了显著的近 S-N 向构造挤压作用,进而形成平行于造山带走向的紧闭褶皱和近直立轴面劈理。

(2) 独居石和锆石 U-Pb 年代学结果显示玛因鄂博和喀拉苏缝合岩体的同构造变形脉体形成时代为 282~266 Ma。

(3) 中国阿尔泰造山带南缘早-中二叠世仍处于挤压构造环境,暗示着中国阿尔泰与其南缘的准噶尔地体汇聚过程仍在继续。

**致谢:** 在稿件评审过程中,中国科学院新疆生态与地理研究所肖文交院士和中山大学张健教授对稿件进行了仔细的评审,并且提出了详细的修改意见和建议,为文章的高质量发表提供了极大的帮助,在此表示衷心的感谢!同时也感谢李志泰、王连峰和宁俊在文章写作过程中提出的意见和帮助!

### 参考文献(References):

Hut D, 刘永江. 1991. 区域构造在花岗岩就位机制中的作用. 世界地质, 10(1): 146-147.

King C and Pendlebury D A. 2013. 研究前沿(Research Fronts)——自然科学与社会科学的前100个探索领域. 科学观察, (4): 1-21.

陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 袁超, 肖文交, 李继亮, 余星, 林秀斌. 2006. 阿尔泰造山带南缘基性杂岩的形成背景及其动力学含义. 岩石学报, 22(1): 127-134.

董连慧, 屈迅, 赵同阳, 徐仕琪, 周汝洪, 王克卓, 朱志新. 2012. 新疆北阿尔泰造山带早古生代花岗岩类侵入序列及其构造意义. 岩石学报, 28(8): 3-12.

董增产, 赵国春, 潘峰, 王凯, 黄博涛. 2019. 青河后造山岩体成因及其对阿尔泰造山带晚古生代构造演化的启示. 岩石学报, 35(4): 1033-1057.

高福平, 周刚, 雷永孝, 王定胜, 陈剑祥, 张海峰, 吴新斌, 刘国仁, 赵忠合. 2010. 新疆阿尔泰山南缘沙尔布拉克一带早二叠世花岗岩的年龄、地球化学特征及地质意义. 地质通报, 29(9): 1281-1293.

韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “缝合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限. 岩石学报, 26(8): 233-246.

简平, 刘敦一, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年. 地学前缘, 10(4): 439-456.

李继亮. 2004. 增生型造山带的基本特征. 地质通报, 23(9-10): 947-951.

刘亚然, 简平, 张维, 石玉若, 王义召, 张履桥, 刘敦一. 2016. 新疆东准噶尔北塔山蛇绿混杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年、氧同位素及其地质构造意义. 岩石学报, 32(2): 537-554.

曲国胜, 张进江. 1991. 额尔齐斯构造带. 北京: 地质出版社: 115-131.

宋鹏, 童英, 王涛, 秦切, 张建军, 宁东旭. 2017. 阿尔泰东南缘泥盆纪花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄、成因演化及构造意义: 钙碱性-高钾钙碱性-碱性岩浆演化新证据. 地质学报, 91(1): 55-79.

孙桂华, 李锦轶, 杨天南, 李亚萍, 朱志新, 杨之青. 2009. 阿尔泰山脉南部线性花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 中国地质, 36(5): 976-987.

仝来喜, 陈义兵, 陈林丽. 2014. 阿尔泰造山带超高温变泥质麻粒岩的确定及其地质意义. 科学通报, 59(20): 1984-1991.

童英, 王涛, Kovach V P, 洪大卫, 韩宝福. 2006. 阿尔泰中蒙边界塔克什肯口岸后造山富碱侵入岩体的形成时代、成因及其地壳生长意义. 岩石学报, 22(5): 1267-1278.

童英, 王涛, 洪大卫, 代雅建, 韩宝福, 柳晓明. 2007. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义. 岩石学报, 23(8): 1933-1944.

汪晟, 徐扛, 黄艳琼, 孔令竹, 齐扬, 宋绍溥, 张健, 蒋映德. 2018. 中国阿尔泰造山带西部二叠纪构造演化: 来自构造地质及独居石 U-Pb 年代学的制约. 大地构造与成矿学, 42(5): 798-811.

王涛, 洪大卫, 童英, 韩宝福, 石玉若. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义. 岩石学报, 21(3): 640-650.

王涛, 童英, 李舫, 张建军, 史兴俊, 李锦轶, 韩宝福, 洪大卫. 2010. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例. 岩石矿物学杂志, 29(6): 595-618.

王涛, 王晓霞, 郭磊, 张磊, 童英, 李舫, 黄河, 张建军.

2017. 花岗岩与大地构造. 岩石学报, 33(5): 459–478.
- 肖文交, B F Windley, 闫全人, 秦克章, 陈汉林, 袁超, 孙敏, 李继亮, 孙枢. 2006. 北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义. 地质学报, 80(1): 32–37.
- 肖文交, 李继亮, 宋东方, 韩春明, 万博, 张继恩, 敖松坚, 张志勇. 2019. 增生型造山带结构解析与时空制约. 地球科学, 44(5): 1661–1687.
- 肖文交, 舒良树, 高俊, 熊小林, 王京彬, 郭召杰, 李锦轶, 孙敏. 2008. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用. 新疆地质, 26(1): 4–8.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 翟明国, 张旗, 陈国能, 王汝成. 2016. 大陆演化与花岗岩研究的变革. 科学通报, 61(13): 1414–1420.
- 张弛, 黄莹. 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨. 地质评论, 38(6): 509–524.
- 赵恒乐, 许凡, 张冀, 杨屹. 2012. 东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩形成时代、地质特征及构造意义. 新疆地质, 30(2): 161–164.
- 周刚, 吴淦国, 董连慧, 张招崇, 董永观, 童英, 何立新, 应立娟. 2009. 新疆准噶尔北东缘乌图布拉克岩体形成时代、地球化学特征及地质意义. 岩石学报, 25(6): 1390–1402.
- 周刚, 张招崇, 王新昆, 王祥, 罗世宾, 何斌, 张小林. 2007. 新疆玛茵鄂博断裂带中花岗质糜棱岩锆石 U-Pb SHRIMP 和黑云母  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄及意义. 地质学报, 81(3): 359–369.
- 庄育勋. 1994. 中国阿尔泰造山带变质作用 *PTS* 演化和热-构造-片麻岩穹窿形成机制. 地质学报, 68(1): 35–47.
- Aleinikoff J N, Schenck W S, Plank M O, Srogi L, Fanning C M, Kamo S L and Bosbyshell H. 2006. Deciphering igneous and metamorphic events in high-grade rocks of the Wilmington Complex, Delaware: Morphology, cathodoluminescence and backscattered electron zoning, and SHRIMP U-Pb geochronology of zircon and monazite. *Geological Society of America Bulletin*, 118(1–2): 39–64.
- Briggs S M, Yin A, Manning C E, Chen Z L and Wang X F. 2009. Tectonic development of the southern Chinese Altai Range as determined by structural geology, thermobarometry,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology, and Th/Pb ion-microprobe monazite geochronology. *The Geological Society of America Bulletin*, 121(9–10): 1381–1393.
- Briggs S M, Yin A, Manning C E, Chen Z L, Wang X F and Grove M. 2007. Late Paleozoic tectonic history of the Ertix Fault in the Chinese Altai and its implications for the development of the Central Asian Orogenic System. *Geological Society of America Bulletin*, 119(7–8): 944–960.
- Broussolle A, Aguilar C, Sun M, Schulmann K, Štípská P, Jiang Y D, Yu Y, Xiao W J, Wang S and Míková J. 2018. Polycyclic Palaeozoic evolution of accretionary orogenic wedge in the southern Chinese Altai: Evidence from structural relationships and U-Pb geochronology. *Lithos*, 314–315: 400–424.
- Broussolle A, Sun M, Schulmann K, Alexandra G, Aguilar C, Štípská P, Jiang Y D, Yu Y and Xiao W J. 2019. Are the Chinese Altai “terrane” the result of juxtaposition of different crustal levels during Late Devonian and Permian orogenesis? *Gondwana Research*, 66: 183–206.
- Cai K D, Sun M, Jahn B, Xiao W J, Long X P, Chen H Y, Xia X P, Chen M and Wang X S. 2016. Petrogenesis of the Permian intermediate-mafic dikes in the Chinese Altai, Northwest China: Implication for a postaccretion extensional scenario. *Journal of Geology*, 124(4): 481–500.
- Cai K D, Sun M and Yuan C. 2010. Geochronological and geochemical study of mafic dykes from the northwest Chinese Altai: Implications for petrogenesis and tectonic evolution. *Gondwana Research*, 18(4): 638–652.
- Cai K D, Sun M, Yuan C, Long X P and Xiao W J. 2011b. Geological framework and Paleozoic tectonic history of the Chinese Altai, NW China: A review. *Russian Geology and Geophysics*, 52: 1619–1633.
- Cai K D, Sun M, Yuan C, Zhao G C, Xiao W J, Long X P and Wu F Y. 2011a. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 949–968.
- Cawood P A, Kröner A, Collins W J, Kusky T M, Mooney W D and Windley B F. 2009. Accretionary orogens through Earth history. *Geological Society, London, Special Publications*, 318: 1–36.
- Chai F M, Mao J W, Dong L H, Yang F Q, Liu F, Geng X X and Zhang Z X. 2009. Geochronology of metarhyolites from the Kangbutiebao Formation in the Kelang basin, Altay Mountains, Xinjiang: Implications for the tectonic evolution and metallogeny. *Gondwana Research*, 16(2): 189–200.
- Collins W J, Beams S D, White A J R and Chappell B W.

1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200.
- Coney P J, Jones D L and Monger J W H. 1980. Cordilleran suspect terranes. *Nature*, 288: 329–333.
- Dickinson W R. 2008. Accretionary Mesozoic-Cenozoic expansion of the Cordilleran continental margin in the California and adjacent Oregon. *Geosphere*, 4: 329–353.
- Gao J, He G Q, Li M S, Xiao X C, Tang Y Q, Wang J and Zhao M. 1995. The mineralogy, petrology, metamorphic *PTDt* trajectory and exhumation mechanism of blueschists, south Tianshan, northwestern China. *Tectonophysics*, 250(1–3): 151–168.
- Gao J and Klemd R. 2003. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: Geochemical and age constraints. *Lithos*, 66(1): 1–22.
- Han B F, Ji J Q, Song B, Chen L H and Li Z H. 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No.1 and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang, and geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2424–2429.
- Huang Y Q, Jiang Y D, Collett S, Wang S, Xu K, Shu T, Li P F and Yuan C. 2020. Magmatic recycling of accretionary wedge: A new perspective on Silurian-Devonian I-type granitoids generation in the Chinese Altai. *Gondwana Research*, 78: 291–307.
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 91(1–2): 181–193.
- Jiang Y D, Schulmann K, Kröner A, Sun M, Lexa O, Janoušek V, Buriánek D, Yuan C and Hanžl P. 2017. Neoproterozoic-Early Paleozoic Peri-Pacific accretionary evolution of the Mongolian collage system: Insights from geochemical and U-Pb zircon data from the Ordovician sedimentary wedge in the Mongolian Altai. *Tectonics*, 36(11): 2305–2331.
- Jiang Y D, Schulmann K, Sun M, Štípská P, Guy A, Janoušek V, Lexa O and Yuan C. 2016. Anatexis of accretionary wedge, Pacific-type magmatism, and formation of vertically stratified continental crust in the Altai Orogenic Belt. *Tectonics*, 35(12): 3095–3118.
- Jiang Y D, Schulmann K, Sun M, Weinberg R F, Štípská P, Li P F, Zhang J, Chopin F, Wang S, Xia X P and Xiao W J. 2019. Structural and geochronological constraints on Devonian suprasubduction tectonic switching and Permian collisional dynamics in the Chinese Altai, Central Asia. *Tectonics*, 38(1): 253–280.
- Jiang Y D, Štípská P, Sun M, Schulmann K, Zhang J, Wu Q H, Long X P, Yuan C, Racek M, Zhao G C and Xiao W J. 2015. Juxtaposition of Barrovian and migmatite domains in the Chinese Altai: A result of crustal thickening followed by doming of partially molten lower crust. *Journal of Metamorphic Geology*, 33(1): 45–70.
- Jiang Y D, Sun M, Zhao G C, Yuan C, Xiao W J, Xia X P, Long X P and Wu F Y. 2010. The 390 Ma high-*T* metamorphic event in the Chinese Altai: A consequence of ridge-subduction? *American Journal of Science*, 310(10): 1421–1452.
- Jones D J, Howell D G, Coney P J and Monger H W H. 1983. Recognition, character and analysis of tectonostratigraphic terranes in western North America // Hashimoto M and Uyeda S. *Accretion Tectonics in the Circum-Pacific Regions*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company: 21–35.
- Klemd R, Gao J, Li J and Meyer M. 2015. Metamorphic evolution of (ultra)-high-pressure subduction-related transient crust in the South Tianshan Orogen (Central Asian Orogenic Belt): Geodynamic implications. *Gondwana Research*, 28(1): 1–25.
- Li P F, Sun M, Rosenbaum G, Cai K D and Yu Y. 2015. Structural evolution of the Irtysh Shear Zone (northwestern China) and implications for the amalgamation of arc systems in the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Structural Geology*, 80: 142–156.
- Li P F, Sun M, Rosenbaum G, Jiang Y D and Cai K D. 2016. Structural evolution of zonal metamorphic sequences in the southern Chinese Altai and relationships to Permian transpressional tectonics in the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonophysics*, 693: 277–289.
- Li P F, Sun M, Rosenbaum G, Jourdan F, Li S and Cai K D. 2017. Late Paleozoic closure of the Ob-Zaisan Ocean along the Irtysh shear zone (NW China): Implications for arc amalgamation and oroclinal bending in the Central Asian orogenic belt. *Geological Society of America Bulletin*, 129(5–6): 547–569.
- Li Z L, Li Y Q, Chen H L, Santosh M, Xiao W J and Wang H H. 2010. SHRIMP U-Pb zircon chronology of ultrahigh-temperature spinel-orthopyroxene-garnet granulite from South Altay orogenic belt, northwestern China.



- Island Arc*, 19(3): 506–516.
- Li Z L, Yang X Q, Li Y Q, Santosh M, Chen H L and Xiao W J. 2014. Late Paleozoic tectono-metamorphic evolution of the Altai segment of the Central Asian Orogenic Belt: Constraints from metamorphic *P-T* pseudosection and zircon U-Pb dating of ultra-high-temperature granulite. *Lithos*, 204: 83–96.
- Lin Z F, Yuan C, Zhang Y Y, Sun M, Long X P, Wang X Y, Huang Z Y and Chen Z W. 2019. Petrogenesis and geodynamic implications of two episodes of Permian and Triassic high-silica granitoids in the Chinese Altai, Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 184: 1–20.
- Liu B, Chen J F, Ma X, Liu J L, Gong E P, Shi W G and Han B F. 2018a. Timing of the final closure of the Irtysh-Zaysan Ocean: New insights from the earliest stitching pluton in the northern West Junggar, NW China. *Geological Journal*, 53(6): 2810–2823.
- Liu W, Liu X J and Liu L J. 2013. Underplating generated A- and I-type granitoids of the East Junggar from the lower and the upper oceanic crust with mixing of mafic magma: Insights from integrated zircon U-Pb ages, petrography, geochemistry and Nd-Sr-Hf isotopes. *Lithos*, 179: 293–319.
- Liu Y L, Zhang H, Tang Y, Zhang X, Lv Z H and Zhao J Y. 2018b. Petrogenesis and tectonic setting of the Middle Permian A-type granites in Altai, northwestern China: Evidences from geochronological, geochemical, and Hf isotopic studies. *Geological Journal*, 53(2): 527–546.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z, Gao C G, Zong K Q and Wang D B. 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-North China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571.
- Liu Z, Bartoli O, Tong L X, Xu Y G and Huang X L. 2020. Permian ultrahigh-temperature reworking in the southern Chinese Altai: Evidence from petrology, *P-T* estimates, zircon and monazite U-Th-Pb geochronology. *Gondwana Research*, 78: 20–40.
- Loiselle M and Wones D. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological of Society of America*, 11(7): 468.
- Long X P, Sun M, Yuan C, Xiao W J and Cai K D. 2008. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: Implications for its tectonic evolution. *Sedimentary Geology*, 208(3–4): 88–100.
- Long X P, Sun M, Yuan C, Xiao W J, Lin S F, Wu F Y, Xia X P and Cai K D. 2007. Detrital zircon age and Hf isotopic studies for metasedimentary rocks from the Chinese Altai: Implications for the Early Paleozoic tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 26(5): 278–407.
- Long X P, Yuan C, Sun M, Safonova I, Xiao W J and Wang Y J. 2012. Geochemistry and U-Pb detrital zircon dating of Paleozoic graywackes in East Junggar, NW China: Insights into subduction-accretion processes in the southern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 21: 637–653.
- Ludwig K R. 2001. User's Manual for a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Special Publication, Berkeley Geochronology Center: 59
- Reese J F, Mosher S, Connelly J and Roback R. 2000. Mesoproterozoic chronostratigraphy of the southeastern Llano uplift, central Texas. *Geological Society of America Bulletin*, 112: 278–291.
- Schermer E R, Howell D G and Jones D L. 1984. The origin of allochthonous terranes: Perspectives on the growth and shaping of continents. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 12: 107–131.
- Şengör A M C and Natal'In B A. 1996. Turcic-type orogeny and its role in the making of the continental crust. *Annual Review of Earth and Planet Science*, 24: 263–337.
- Şengör A M C, Natal'In B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307.
- Song P, Wang T, Tong Y, Zhang J J, Huang H and Qin Q. 2019. Contrasting deep crustal compositions between the Altai and East Junggar orogens, SW Central Asian Orogenic Belt: Evidence from zircon Hf isotopic mapping. *Lithos*, 328–329: 297–311.
- Sun M, Long X P, Cai K D, Jiang Y D, Wang B, Yuan C, Zhao G, Xiao W J and Wu F Y. 2009. Early Paleozoic ridge subduction in the Chinese Altai: Insight from the abrupt change in zircon Hf isotopic compositions. *Science in China (Series D)*, 52(9): 1345–1358.
- Sun M, Yuan C, Xiao W J, Long X P, Xia X P, Zhao G C, Lin S F, Wu F Y and Kröner A. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the early to middle Palaeozoic. *Chemical Geology*, 247(3–4): 352–383.
- Tong L X, Chen Y B and Chen L L. 2014a. Confirmation of

- ultrahigh-temperature metapelitic granulite in the Altay orogen and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 59(27): 3441–3448.
- Tong Y, Wang T, Jahn B M, Sun M, Hong D W and Gao J F. 2014b. Post-accretionary Permian granitoids in the Chinese Altai orogen: Geochronology, petrogenesis and tectonic implications. *American Journal of Science*, 314(1): 80–109.
- Tong Y, Wang T, Siebel W, Hong D W and Sun M. 2012. Recognition of early Carboniferous alkaline granite in the southern Altai orogen: Post-orogenic processes constrained by U-Pb zircon ages, Nd isotopes, and geochemical data. *International Journal of Earth Sciences*, 101(4): 937–950.
- Wan B, Xiao W J, Windley B F and Yuan C. 2013. Permian hornblende gabbros in the Chinese Altai from a subduction-related hydrous parent magma, not from the Tarim mantle plume. *Lithosphere*, 5(3): 290–299.
- Wang T, Hong D W, Jahn B, Tong Y, Wang Y B, Han B F and Wang X X. 2006b. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. *Journal of Geology*, 114: 735–751.
- Wang T, Tong Y, Zhang L, Li S, Huang H, Zhang J J, Guo L, Yang Q D, Hong D W, Donskaya T, Gladkochub D and Tserendash N. 2017. Phanerozoic granitoids in the central and eastern parts of Central Asia and their tectonic significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 368–392.
- Wang W, Wei C J, Wang T, Lou Y X and Chu H. 2009. Confirmation of pelitic granulite in the Altai orogen and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 2543–2548.
- Wang W R, Wei C J, Zhang Y H, Chu H, Zhao Y and Liu X C. 2014. Age and origin of sillimanite schist from the Chinese Altai metamorphic belt: Implications for late Palaeozoic tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *International Geology Review*, 56(2): 224–236.
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Zhang W L, Liu X M and Zhang G L. 2006a. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution. *Precambrian Research*, 145(1–2): 111–130.
- Wang X X, Wang T and Zhang C L. 2015. Granitoid magmatism in the Qinling orogen, central China and its bearing on orogenic evolution. *Science China: Earth Sciences*, 58: 1497–1512.
- Wang Z H, Sun S, Li J L, Hou Q L, Qin K Z, Xiao W J and Hao J. 2003. Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang, China: Geochemical and geochronological constraints from the ophiolites. *Tectonics*, 22(2): 1–15. <https://doi.org/10.1029/2002TC001396>.
- Wei C J, Clarke G, Tian W and Qiu L. 2007. Transition of metamorphic series from the Kyanite- to andalusite-types in the Altai orogen, Xinjiang, China: Evidence from petrography and calculated KFMASH and KFMASH phase relations. *Lithos*, 96(3–4): 353–374.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, Kröner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Geological Society, London, Special Publications*, 164(1): 31–47.
- Windley B F, Kröner A, Guo J H, Qu G S, Li Y Y and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution. *The Journal of Geology*, 110(6): 719–737.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J and Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1–21. <https://doi.org/10.1029/2002TC001484>
- Xiao W J, Windley B F, Yuan C, Sun M, Han C M, Lin S F, Chen H L, Yan Q R, Liu D Y, Qin K Z, Li J L and Sun S. 2009. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids. *American Journal of Science*, 309(3): 221–270.
- Yang T N, Li J Y, Liang M J and Wang Y. 2015. Early Permian mantle-crust interaction in the south-central Altaids: High-temperature metamorphism, crustal partial melting, and mantle-derived magmatism. *Gondwana Research*, 28(1): 371–390.
- Yang T N, Li J Y, Zhang J and Hou K J. 2011. The Altai-Mongolia terrane in the Central Asian Orogenic Belt (CAOB): A peri-Gondwana one? Evidence from zircon U-Pb, Hf isotopes and REE abundance. *Precambrian Research*, 187(1–2): 79–98.
- Yuan C, Sun M, Xiao W J, Li X H, Chen H L, Lin S F, Xia

- X P and Long X P. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids. *Chemical Geology*, 242(1–2): 22–39.
- Zhang C L, Santosh M, Zou H B, Xu Y G, Zhou G, Dong Y G, Ding R F and Wang H Y. 2012. Revisiting the “Irish tectonic belt”: Implications for the Paleozoic tectonic evolution of the Altai orogeny. *Journal of Asian Earth Sciences*, 52: 117–133.
- Zhang C L, Zou H B, Yao C Y and Dong Y G. 2014. Origin of Permian gabbroic intrusions in the southern margin of the Altai Orogenic belt: A possible link to the Permian Tarim mantle plume? *Lithos*, 204: 112–124.
- Zhang J, Sun M, Schulmann K, Zhao G C, Wu Q H, Jiang Y D, Guy A and Wang Y J. 2015. Distinct deformational history of two contrasting tectonic domains in the Chinese Altai: Their significance in understanding accretionary orogenic process. *Journal of Structural Geology*, 73: 64–82.
- Zheng B, Han B F, Liu B and Wang Z Z. 2019. Ediacaran to Paleozoic magmatism in West Junggar Orogenic Belt, NW China, and implications for evolution of Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 338–339: 111–127.
- Zou T R, Chao H Z and Wu B Q. 1989. Orogenic and anorogenic granitoids in the Altay Mountains of Xinjiang and their discrimination criteria. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2: 45–64.

## Late Paleozoic Granite Veins in the Southern Chinese Altai: Structural Characteristics, Geochronology and Tectonic Implications

XU Kang<sup>1,2</sup>, SHU Tan<sup>1,2</sup>, KONG Lingzhu<sup>1,2</sup>, LI Zhiyong<sup>1,2</sup>, WANG Sheng<sup>1,2</sup> and JIANG Yingde<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Late Paleozoic A-type granites in the southern Chinese Altai have been traditionally taken as an indicator for a post-orogenic extensional environment after the amalgamation between the Chinese Altai and the southern Junggar arc domain. However, this conception was established merely based on the geochemical characteristics of the granites, and deformational patterns of these granites have rarely been investigated by using modern petro-structural methods. Moreover, this notion is at odds with the notion that the southern Chinese Altai is featured by contractional structures. In order to clarifying the regional tectonic setting during the emplacement of the late Paleozoic granites in the southern Chinese Altai, deformational characteristics as well as zircon and monazite U-Pb geochronology of the granite veins in the Qinghe (Mayinebo pluton) and Kalasu (Kalasu pluton) areas were investigated. Field observations indicate that these two areas are characterized by a major NNE-SSE-direction compression that resulted in the formation of tight folds and penetrative NWW-SEE foliation  $S_2$ . Oval-shape granite intrusions in these regions lack apparent deformation. In contrast, abundant granite veins evolved from these intrusions are orthogonal to the regional main foliation  $S_2$  and followed by their tight folding, indicating their syntectonic emplacement. Monazite U-Pb dating yielded  $273 \pm 3$  Ma and  $266 \pm 2$  Ma for two deformed granite veins from the Mayinebo area. Zircon U-Pb dating yielded  $282 \pm 10$  Ma for a deformed granite vein from the Kalasu area. Collectively, these features suggest that these Early to Middle Permian granite veins were emplaced under a contraction environment. Combined with the available regional data, we suggest that the southern Chinese Altai was under a compressional tectonic setting which was probably responsible for the on-going amalgamation between the Chinese Altai and the Junggar arc domain during Early-to-Middle Permian.

**Keywords:** Chinese Altai; Permian; syn-tectonic granite; U-Pb geochronology; tectonic setting