新疆阿尔泰造山带乌希里克地区奥陶纪岩浆活动及其地质意义*

田红彪[1,2] 郑波[3] 何峻岭[2]
TIAN HongBiao[1,2], ZHENG Bo[3] and HE JunLing[2]

1. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083
2. 中国人民武装警察部队黄金第八支队,乌鲁木齐 830057
3. 中国地质调查局成都地质调查中心,成都 610081
1. *School of Earth Sciences and Rresources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
2. *No. 8 Team of Gold Exploration Branch of Chinese Armed Police Force, Urumqi* 830057, *China*
3. *Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu* 610081, *China*

2017-03-12 收稿, 2017-07-01 改回.

Tian HB, Zheng B and He JL. 2017. The Ordovician magmatism and implication in Wuxilike, Altay orogenic belt, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 33(8):2591 – 2603

Abstract Here we report the Ordovician arc setting igneous rocks in Wuxilike located in the core area of Chinese Altay orogenic belt. Zircons from dacite and amphibolite of Habahe Group, which had been considered as Middle to Upper Ordovician, yielded mean ages of 486 ± 7Ma and 482 ± 5Ma respectively, which show an Early Ordovician eruption age. The Asiqiatao diorite, Duluoai tonalite and Halaerci granodiorite intruded into the Habahe Group, and with intrusion ages of 461 ± 2Ma, 452 ± 5Ma and 455 ± 3Ma, respectively. Thus, the strata near Wuxilike should be separated out from the originally named Middle-Upper Ordovician Habahe Group. Both the intrusive and extrusive rocks are calc-alkaline to high-K calc-alkaline, metaluminous to peraluminous, depleted in Nb, Ta, Zr and Hf and enriched in K, Rb and Ba, and show right incline REE patterns. These features are similar to arc rocks. But the variable Na and K contents with Na_2O/K_2O values from 0.73 to 2.14 and enriched Sr-Nd isotopic compositions with I_{Sr} from 0.7050 to 0.7098, $\varepsilon_{Nd}(t)$ from −2.0 to +0.5 and t_{DM} from 1.6Ga to 1.2Ga implied a continental arc setting. We propose that the Ordovician Wuxilike igneous rocks were generated in an active continental margin when the Irtysh-Zhaisan Ocean plate subducted under the Altay-Mongolian microcontinent.

Key words Granite; U-Pb dating; Geochemistry; Continental margin arc; Altay

摘 要 阿尔泰乌希里克地区位于阿尔泰造山带的核心部位,本文首次报导该地区出露的早古生代奥陶纪花岗质侵入岩和火山岩。年代学结果表明该地区原来划为中-上奥陶统哈巴河群中的英安岩时代为 486 ± 7Ma,斜长角闪岩的原岩时代为 482 ± 5Ma,属早奥陶世,而侵位于这套地层中的阿斯恰套岩体、杜洛埃岩体和哈拉尔次岩体的结晶年龄分别为 461 ± 2Ma、452 ± 5Ma、455 ± 3Ma,属中-晚奥陶世。这些岩体和围岩的时空关系表明乌希里克地区哈巴河群应属下奥陶统。现有资料表明哈巴河群时间跨度很大,应该通过详细工作将其解体。这些侵入岩和喷出岩均属钙碱性到高钾钙碱性系列,准铝质到过铝质,具有相似的右倾稀土配分模式,亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf,富集大离子亲石元素 K、Rb、Ba 等,具弧岩浆岩的地球化学特征。哈拉尔次岩体和英安岩富 K 贫 Na,Na_2O/K_2O 值在 0.73 ~ 0.87 之间,除阿斯恰套岩体以外所有样品都显示富 Al 特征,不同于典型的岛弧岩浆岩,而具有壳源岩浆岩的特征。哈拉尔次岩体和杜洛埃岩体具有较高的初始锶比值(I_{Sr} = 0.7050 ~ 0.7098),$\varepsilon_{Nd}(t)$值在 −2.0 ~ +0.5 之间,Nd 模式年龄 1.6 ~ 1.2Ga,指示演化的大陆地壳物质可能是这些奥陶纪岩浆岩的重要物源,同时加入了地幔或新生地壳物质。结合区域地质背景,认为乌希里克地区奥陶纪岩浆岩形成于活动大陆边缘,是额

* 本文受中国地质调查局地质调查项目(12120113071900)资助.
第一作者简介: 田红彪,男,1969 年生,博士生,构造地质学专业,E-mail: 2521537550@qq.com

尔齐斯-斋桑洋向北俯冲作用的产物。

关键词 花岗岩;U-Pb 年龄;奥陶纪;活动大陆边缘;阿尔泰造山带

中图法分类号 P588.121; P588.142; P597.3

1 引言

阿尔泰造山带位于西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块之间,呈北西-南东向横贯于中、俄、哈、蒙四国,绵延 800 余千米,是由一系列大陆块体、岛弧和增生杂岩构成的增生型造山带,是中亚造山带的重要组成部分(Sengör *et al.*, 1993)。中国阿尔泰造山带(阿尔泰造山带境内部分)出露大量花岗岩,约占阿尔泰地区面积的 40%,如果将花岗质片麻岩也计入,比例可高达 70%(Windley *et al.*, 2002)。因此对阿尔泰造山带花岗岩的时代、成因和形成背景的研究具有重要意义。前人对这些花岗岩已经做了大量的研究,包括年代学(王登红等,2002;童英等,2006;Wang *et al.*, 2006)、岩石成因(王中刚等,1998;Yang *et al.*, 2014; Zheng *et al.*, 2016)、与花岗岩有关的地壳生长(赵振华等,1993;Chen and Jahn, 2002; Wang *et al.*, 2009)等,这些研究极大的推动了阿尔泰造山带的地质研究。然而,对中国阿尔泰造山带的早古生代构造背景至今仍存在较大的争议,包括具有前寒武纪微陆块(Hu *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2009)的被动大陆边缘(何国琦等,1990;Chen and Jahn, 2002)或活动大陆边缘(Windley *et al.*, 2002, 2007; Sun *et al.*, 2008; Xiao *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2010)以及增生杂岩(Sengör and Natal'in, 1996)等,其中,比较主流的观点认为中国阿尔泰造山带为早-中古生代大陆边缘弧,兼具活动大陆边缘和前寒武纪微陆块的特征(Hu *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2006; Long *et al.*, 2007, 2010; Sun *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009)。

时代框架是研究一个地区地质演化的基础,中国阿尔泰造山带岩浆作用从早古生代一直延续至晚三叠世(图 1; Wang *et al.*, 2006;刘锋等, 2009;Sun *et al.*, 2009;童英等, 2006;Tong *et al.*, 2014)。Wang *et al.*(2006)指出中国阿尔泰造山带的岩浆活动时限主要在 460 ~ 375Ma 之间,400 ~ 410Ma 之间达到峰值,属于大陆弧岩浆活动的范畴,认为阿尔泰造山带的俯冲和增生作用可能始于 460Ma 左右。通过对中国阿尔泰造山带最老的哈巴河群的碎屑锆石研究,Long *et al.*(2010)认为中国阿尔泰造山带在整个早古生代甚至延伸至震旦纪都存在俯冲带岩浆作用,但缺乏直接的岛弧岩浆作用的证据。中国阿尔泰造山带中奥陶纪之前的岩浆事件记录相对较少,研究也较弱,这在一定程度上制约了阿尔泰造山带大地构造演化的研究。笔者近年在阿勒泰市北东约 30km 的乌希里克一带开展 1∶5 万区域地质调查工作中,发现一套从奥陶纪初期一直延续至中晚奥陶世的侵入岩和喷出岩组合。通过这套岩石的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及 Sr-Nd 同位素示踪研究,为中国阿尔泰造山带在早古生代的大地构造演化史提供了新的依据。

2 地质背景

与阿尔泰山走向一致,中国阿尔泰造山带的地层和岩浆岩的分布亦大体呈北西向展布。根据 Windley *et al.*(2002)和 Wang *et al.*(2006)的观点,中国阿尔泰造山带可以划分为北西向展布的五个部分,其中中间的三个部分可能具有前寒武纪基底,本文将其按一个单元介绍,将中国阿尔泰划分为北部、中部和南部三个单元(图 1a)。北部单元位于富蕴县北中蒙边界一带(仅占中国阿尔泰的很小一部分),以弧形展布的下石炭统地层为分界标志。北部阿尔泰主要为一套中到晚泥盆世的岛弧背景下形成(Xiao *et al.*,2004)的安山岩和英安岩,以及晚泥盆世到早石炭世的变质沉积岩,但是侵入中泥盆世地层中的花岗岩具有早泥盆世的 Pb-Pb 年龄(楼法生,1997),因此北部阿尔泰地区这套地层可能老于中泥盆世。中部单元是中国阿尔泰造山带的主体部分,其地层时代从震旦纪一直延续至泥盆纪,具有从北东向南西方向逐渐变年轻的趋势,也有研究者将中部单元西南缘以泥盆纪弧火山岩和火山碎屑岩为主的部分单独划分为独立的地块(Windley *et al.*,2002;Wang *et al.*, 2006),认为它是从阿尔泰陆块分离出来的,晚泥盆世之前形成的库尔提蛇绿岩(Zhang *et al.*, 2003)可能代表了弧后盆地的扩张事件(Wang *et al.*, 2006);喀纳斯湖一带出露震旦纪到中奥陶统低级变质沉积岩和火山岩,向南东方向逐渐以奥陶系到志留系为主,包含角闪岩相到绿片岩相的变质沉积岩和火山岩(Wang *et al.*, 2009)。中部阿尔泰北部部分(震旦纪-志留纪)被认为是阿尔泰微陆块的最主要组成部分(Hu *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2004),大量中古生代大陆边缘弧型花岗岩侵入到中部阿尔泰单元,并显示出强烈的北西向定向拉长的特征。南部单元分布在额尔齐斯断裂带两侧,以广泛分布的石炭系为划分标志。泥盆纪之后中国阿尔泰山的岩浆活动明显减弱,二叠纪-三叠纪时期未变形、无明显定向的后碰撞花岗岩侵入到中古生代之前的弧岩浆岩中(图 1;童英等,2006)。

3 岩相学

本文选取乌希里克一带的阿斯恰套岩体、杜洛埃岩体和哈拉尔次岩体作为研究对象,这些岩体侵位于中-上奥陶统哈巴河群中。由于这套地层的时代归属还存在争议,因此本文还对其中的英安岩和斜长角闪岩进行了研究,采样位置见图 1b。

阿斯恰套闪长岩呈近椭圆状或半椭圆状岩株出露于研

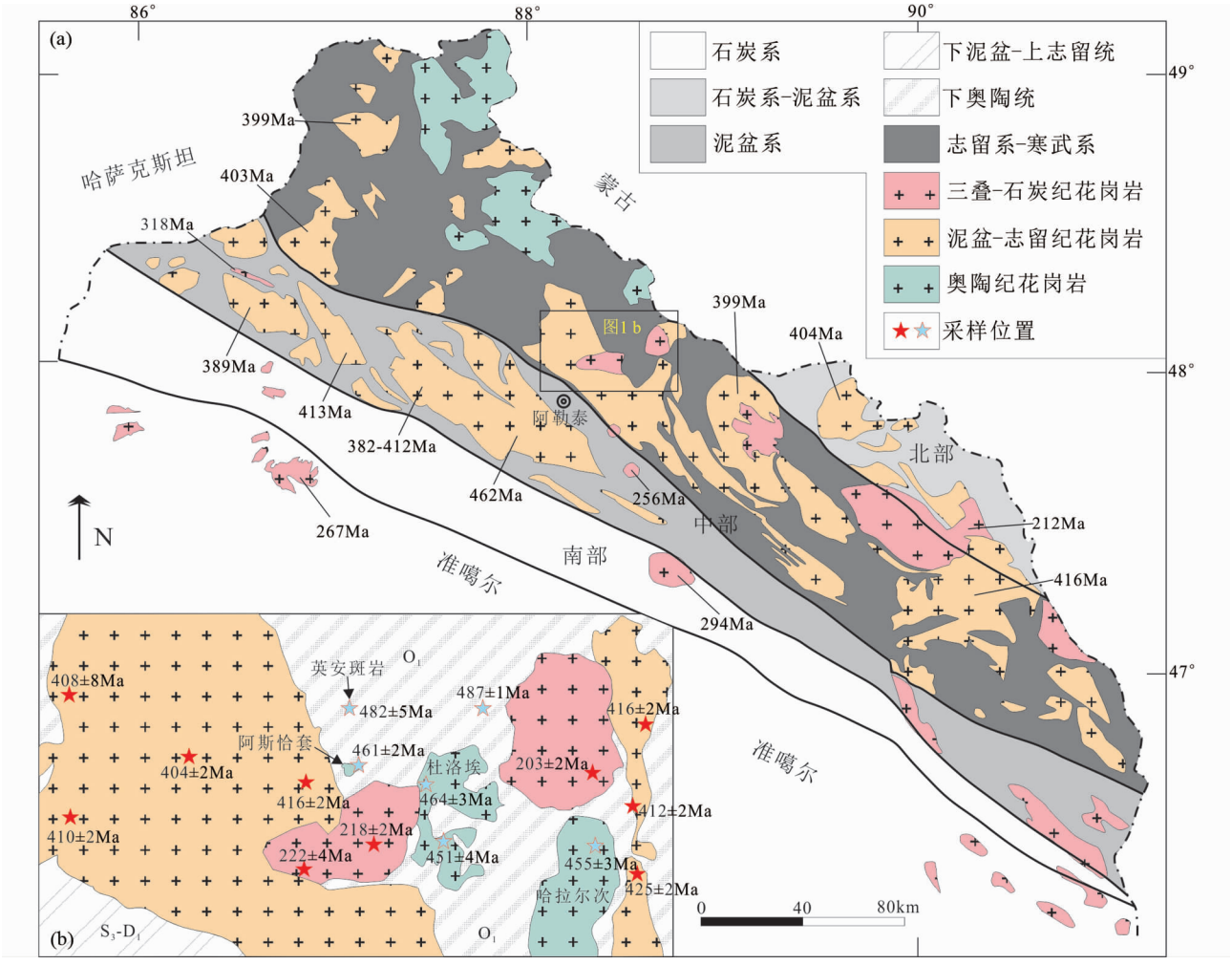


图 1 中国阿尔泰地区地质图(a,据 Wang *et al.*, 2006)和阿尔泰乌希里克地区地质及采样位置图(b)

岩体年龄据 Wang *et al.* (2006, 2009)

Fig. 1 Geological map of Chinese Altay (a, after Wang *et al.*, 2006) and geological and sample locality map of Wuxilike, Altay (b)

Ages of granitoids from Wang *et al.* (2006, 2009)

究区中部,出露面积仅 1.2km^2。岩石风化面呈土灰色,新鲜面为灰绿色,细粒结构,块状构造,由斜长石、角闪石及少量石英组成。斜长石呈半自形板状,部分具环带结构,粒径 <0.3×1.0mm,均匀分布,62%;角闪石呈柱状,长轴粒径 <1.0mm,具绿泥石化,均匀分布,35%;石英呈他形粒状,粒径 <0.3mm,稀疏分布,3%(图 2a)。

杜洛埃岩体位于研究区中部偏东,形状极不规则,面积约 51km^2,岩性为黑云母英云闪长岩,岩石呈灰白色,中细粒结构,块状构造,主要由石英、斜长石和黑云母组成。斜长石呈半自形板状,粒径 <2.6mm,均匀分布,59%;石英呈他形粒状,粒径 <0.5mm,均匀定向分布,30%;云母多为黑云母,少量白云母,片状,片径 <1.5mm,部分聚集成条带状定向分布,12%(图 2b)。

哈拉尔次岩体位于研究区东南部额尔齐斯河两侧,呈南北向椭圆状,岩性包括黑云母花岗闪长岩和黑云母二长花岗岩,U-Pb 定年样品采自黑云母二长花岗岩。黑云母花岗闪长岩灰白色,中-粗粒花岗结构,块状构造,由钾长石、石英、斜长石和黑云母所组成,含有少量白云母,斜长石呈半自形板状,部分具环带结构,粒径 <2.5mm,具弱绢云母化,均匀分布,55% ~60%;黑云母呈片柱状,粒径 <0.8×2.5mm,具绿泥石化,均匀分布,30% ~35%;石英呈他形不规则状,充填于斜长石、角闪石间,2% ~5%(图 2c)。岩体中可见到角闪闪长岩包体,包体呈椭圆状,长轴方向与流线方向一致。黑云母二长花岗岩灰白色,中粒花岗结构,块状构造,由钾长石、斜长石、石英和黑云母组成。钾长石呈他形粒状,粒径多为 0.3 ~3.0mm,具条纹及格子双晶,多为微斜长石及条纹长石,均匀分布,18% ~25%;斜长石呈半自形板状,聚片双晶,部分具环带,粒径小于 2.0×4.0mm,具较强绢云母化,均匀

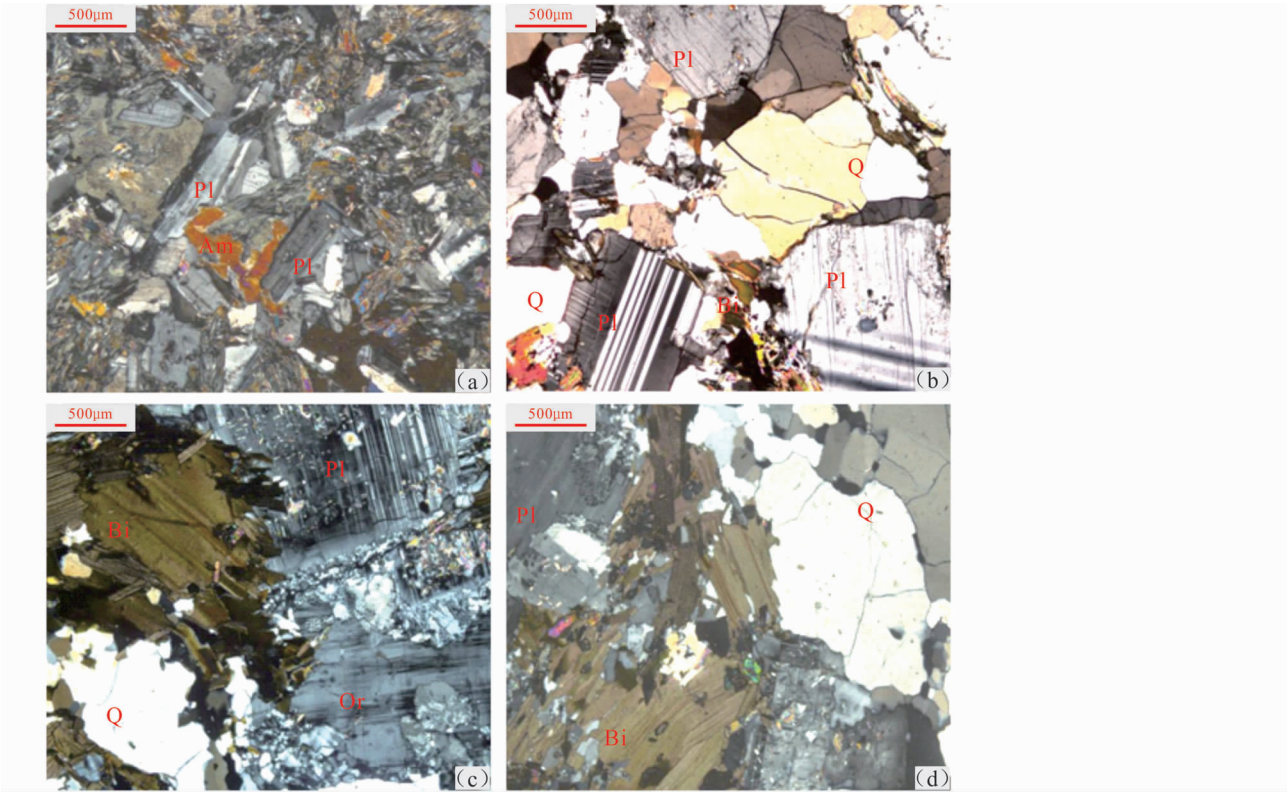


图 2 主要岩性微观特征照片

Q-石英;Pl-斜长石;Am-角闪石;Bi-黑云母;Or-正长石

Fig. 2 Microphotographs showing characteristics of major igneous rocks

分布,35% ~40%;石英呈他形粒状,粒径 <1.3mm,部分具变质重结晶特征,均匀分布,30% ~35%;黑云母片状,片径 <2.0mm,稀疏分布,具重结晶特征,8% ~10%(图 2d)。

产于哈巴河群中的英安岩和斜长角闪岩均具有弱的定向特征。斜长角闪岩呈似层状产于地层之中,灰绿色,细粒结构,块状构造,主要由斜长石、角闪石等组成,斜长石呈长板状,粒径 <3.0mm,杂乱分布,约占 60%;角闪石呈半自形柱状,粒径 <1.5mm,多分布于斜长石构成的格架内,约占 36%;黑云母呈片状,<0.6mm,分布于斜长石格架内,约占 2%;石英呈他形粒状,粒径 <0.3mm,稀疏分布,约占 2%。通过原岩分析,斜长角闪岩原岩为碱性玄武岩。

4 分析方法

锆石挑选、制靶、阴极发光照相在武汉上谱分析科技有限公司制作,LA-ICP-MS 测试工作在西安地质调查中心完成。采用 FEI 公司 XL30 型 SFEG 电子束进行锆石内部结构显微照相分析。锆石 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 定年实验采用美国 Agilent 公司生产的 Agilent7700X 质谱仪,激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 Geolas Pro,激光剥蚀斑束直径为 32μm,频率为 9Hz。以 ^{29}Si 作为内标元素进行校正,以国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标,分析方法及仪器参数见文献(Yuan *et al.*, 2004)。样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER(ver4.0, MacquarieUniversity)程序处理,采用 Andersen 方法对普通 Pb 进行校正(Anderson, 2002),年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot(ver. 2.49)完成(Ludwig, 2012)。

主量元素和微量元素分析在中国地质调查局西安地质调查中心完成。主量元素除 FeO、LOI 采用标准分析为湿化学法分析外,其他采用 Xios4.0kwX 型 X 荧光光谱仪(XRF)测定;微量元素和稀土元素采用 X-SeriesII 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,检测限优于 5×10^{-9},相对标准偏差优于 5%。Sr-Nd 同位素的化学分离和同位素比值测定在中国科学院地质与地球物理所稳定同位素地球化学实验室完成,测试仪器为德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电离质谱计。分别采用 $^{88}Sr/^{86}Sr = 8.375209$ 和 $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$ 对 Sr 和 Nd 同位素比值进行质量分馏校正。Rb-Sr 和 Sm-Nd 的全流程本底为 250pg 和 100pg。浓度($^{147}Sm/^{144}Nd$ 和 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 比值)误差小于 0.5%。Rb/Sr 和 Sm/Nd 比值的不确定度分别为 ±2% 和 ±0.5%。测试过程中分别对 Sr 标准溶液 NBS-987 和 Nd 标准溶液 JNdi-1 测得 $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.710261 \pm 0.000012$($n = 5, 2\sigma$)和 $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512119 \pm 0.000011$($n$



图 3 本文研究的部分锆石 CL 图像

束斑直径为 32μm

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of parts of the zircons from this study

=5,2σ),与参考值吻合。对 USGS 标准物质 BCR-2 进行了测试,结果为$^{87}Sr/^{86}Sr = 0.705020 \pm 0.000014$ 和$^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512623 \pm 0.000011$,与参考值基本一致。化学流程和测试过程详见参考文献(Li *et al.*, 2012, 2015)。

5 分析结果

5.1 锆石年龄

本文共对 5 个样品中的 162 颗锆石进行 U-Pb 年代学测试,详细分析结果见电子版附表 1。

5.1.1 阿斯恰套岩体

锆石颗粒晶形完好,以浅黄色、无色为主,透明-半透明,呈长柱状或短柱状。锆石生长环带清晰(图 3),Th/U 比值在 0.47 ~ 0.90 之间,具有岩浆成因锆石特征。本次测试的 21 颗锆石给出的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄非常集中(图 4a),分布在 465 ~ 458Ma 之间,单颗粒锆石年龄谐和度均在 10% 以内,给出的谐和年龄为 461 ± 3Ma(MSWD = 1.3),$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值为 461 ± 3Ma(MSWD = 0.17),代表阿斯恰套闪长岩的结晶年龄,即阿斯恰套岩体形成于中奥陶世。

5.1.2 杜洛埃岩体

锆石颗粒晶形完好,无色透明-半透明,呈长柱状或短柱状。具有明显的生长环带,Th/U 比值在 0.02 ~ 1.22 之间,具有岩浆成因锆石特征。部分锆石具有重结晶现象和核边结构。对该岩体北部的 9008 样品中 20 粒锆石进行了测试,

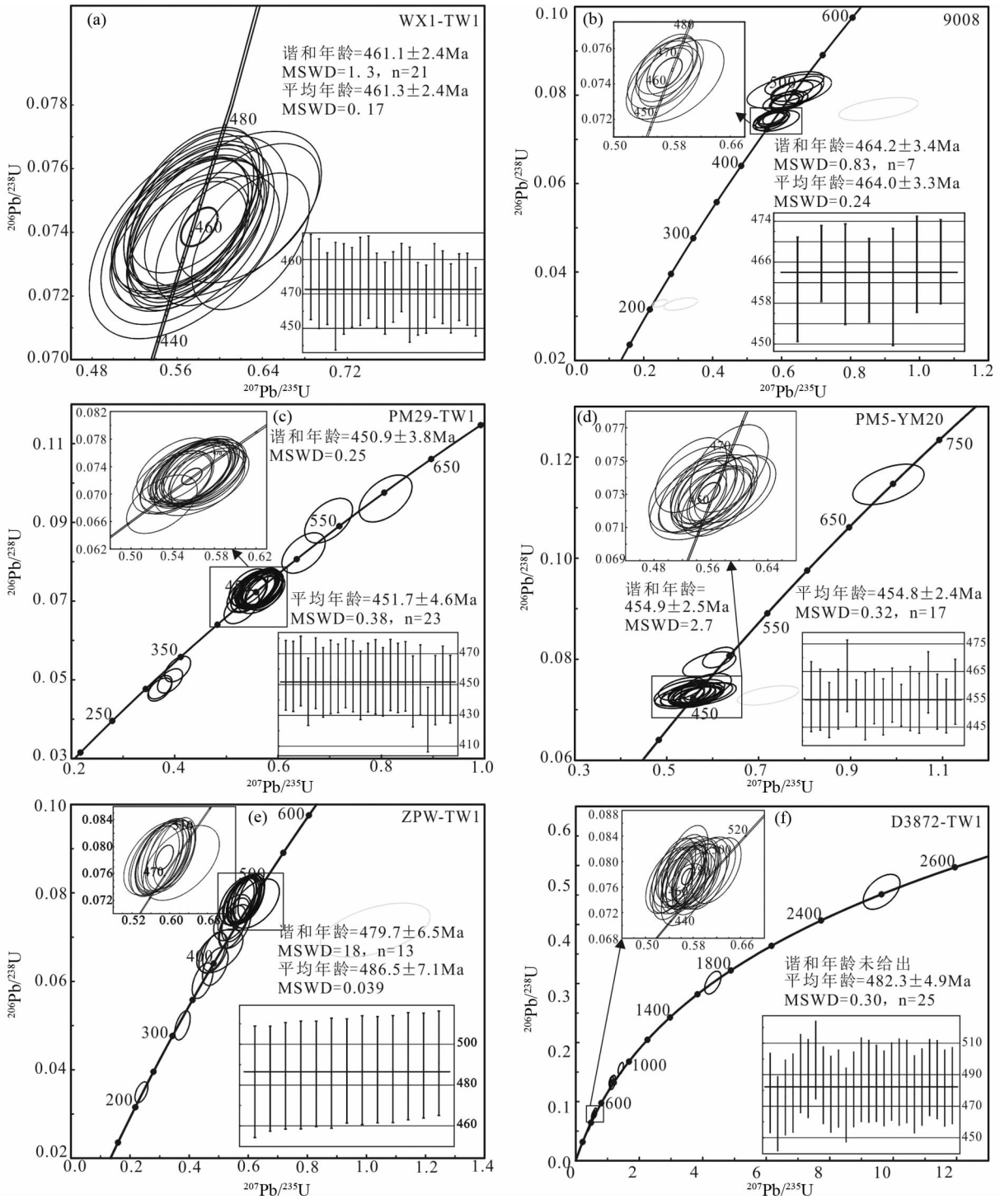


图 4 乌希里克地区岩浆岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams showing zircon ages obtained by LA-ICP-MS for igneous rocks in Wuxilike

除明显不谐和的 12 和 14 号点外,余下 18 颗锆石给出的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄在 512 ~ 209Ma 之间(图 4b)。这些年龄可以分为三个阶段,10 颗较老而分散的锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄在 512 ~ 486Ma 之间;7 颗分布集中的锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄在 466 ~ 461Ma 之间,相应的谐和年龄和 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值分别为 464 ± 3Ma(MSWD = 0.83)和 464 ± 3Ma(MSWD = 0.24);1 颗锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄明显年轻,为 209 ± 2Ma。最老的较分散的一组年龄与围岩哈巴河群的碎屑锆石年龄比较一致(Long *et al.*, 2010),可能代表了成岩过程中捕获的锆石;最年轻的一颗锆石的时代与研究

区中最晚期的花岗岩时代一致(图 1a),可能是杜洛埃岩体受到了晚期岩浆作用的影响,464 ±3Ma 代表杜洛埃岩体的结晶年龄。该岩体南部的 PM29-TW1 样品中 30 粒锆石均给出了谐和的年龄,$^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄在 591 ~299Ma 之间,也可以分为三个阶段(图 4c),三颗较老的锆石分别为 509 ±12Ma、558 ±14Ma 和 591 ±14Ma,4 颗锆石给出了较年轻的 331 ~299Ma 的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄,前者可能为继承锆石,后者可能与新疆北部晚古生代后碰撞岩浆事件有关(韩宝福等,2006)。其余 23 颗锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄在 459 ~427Ma 之间,相应的谐和年龄和 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值分别为 451 ±4Ma(MSWD = 0.25)和 452 ±5Ma(MSWD = 0.38),该年龄与采自杜洛埃岩体北部的 9008 样品给出的年龄比较接近,也代表该岩体的结晶年龄。

5.1.3 哈拉尔次岩体

锆石晶型完好,多为短柱状,长宽比介于 1∶2 ~1∶3 之间,生长环带清晰(图 3),部分锆石环带显示对称的特征或内部还含有包体,外部形态到内部结构基本相似,Th/U 比值大多大于 0.4,显示出典型的原生岩浆锆石特征。对哈拉尔次岩体样品 PM5-YM20 中的 21 颗锆石进行了测试(图 4d),除 14 号点以外均给出了谐和的年龄,期中 17、13 和 6 号点分别给出了较老的 699 ±9Ma、498 ±5Ma 和 490 ±6Ma,可能代表了继承性锆石的年龄,但是在锆石形貌及阴极发光图像上并没有显示明显的区别。其余 17 颗锆石给出的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄在 464 ~451Ma 之间,谐和年龄和 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值分别为 455 ±3Ma(MSWD = 2.7)和 455 ±3Ma(MSWD = 0.32),代表哈拉尔次岩体的结晶年龄。

5.1.4 斜长角闪岩

锆石以无色为主,大部分锆石呈短柱状,小部分为长柱状,多数锆石岩浆结晶环带比较发育,Th/U 值为 0.24 ~2.84,具岩浆锆石的特征。部分锆石具有重结晶现象。25 个测点中除 24 号点给出明显不谐和的年龄外,其余 24 点的谐和度都在 10% 以内,$^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄在 491 ~221Ma 之间,年龄组成复杂(图 4e)。比较年轻的两个点(8 号点 221 ±6Ma、21 号点 315 ±8Ma)与区域内后碰撞岩浆事件重合。5 个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄分散在 417 ~376Ma 之间,另有 5 个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄集中在 462 ~446Ma 之间,而其余 13 个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄集中在 491 ~482Ma 之间,并给出 480 ±7Ma(MSWD = 18)的谐和年龄和 487 ±7Ma(MSWD = 0.039)的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值。考虑到区域上的岩浆事件、变质事件的时间和锆石年龄特征,认为 486 ±7Ma 可能代表了斜长角闪岩原岩的喷出年龄。

5.1.5 英安岩

锆石多为短柱状或次椭圆状,以浅黄色、无色为主,晶棱晶面界线清晰,多发育有典型的锆石生长韵律环带,Th/U 比值 0.15 ~1.12,具岩浆锆石典型特征,少量锆石内部可见继承锆石核或重结晶现象,无生长环带。测年样品采自哈巴河群中,35 颗锆石的测试结果非常复杂,所有年龄的谐和度均在 10% 以内,$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(>1000Ma 时为 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄)从 2386Ma 到 337Ma(图 4f)。3 颗锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄明显年轻,分别为 337 ±8Ma、358 ±9Ma 和 434 ±11Ma,可能为后期变质或岩浆事件的叠加。7 颗锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄从 2386 到 516Ma,这些较老的锆石可能来源于岩浆岩的源区或是围岩,在锆石阴极发光图像上部分老的锆石具有明显的继承性核(图 3)。其余 25 颗锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄从 499 到 465Ma,没有得到谐和年龄,$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值为 482 ±5Ma,代表英安岩的年龄。

5.2 主微量数据

对采自阿斯恰套岩体、杜洛埃岩体、哈拉尔次岩体和哈巴河群中英安岩的 11 件样品进行了主、微量元素的分析,分析结果见表 1。

阿斯恰套岩体的 SiO_2 含量在 52.14% ~56.91% 之间,属辉石闪长岩的范畴,杜洛埃岩体、哈拉尔次岩体和英安岩具有相似的 SiO_2 含量,在 65.82% ~72.19% 之间,属花岗闪长岩和花岗岩的范畴(图 5a),与矿物学观察一致。所有样品 Na_2O/K_2O 比值变化较大,介于 0.73 到 2.06 之间,在富 K 到富 Na 之间变化,即便是同一岩体变化也较大,如杜洛埃岩体(表 1)。阿斯恰套岩体四个样品均属钙碱性系列,而其他样品分布于钙碱性到高钾钙碱性区域(图 5b)。阿斯恰套岩体属准铝质系列,而其他岩体和英安岩属过铝质系列(图 5c)。

在微量元素蛛网图上,所有样品均具有富集 K、Rb、Th、U 等大离子亲石元素和亏损 Nb、Ta 等高场强元素的特征(图 6b)。中性的阿斯恰套岩体的 Sr 亏损程度明显弱于其他样品,或是不亏损。所有样品均具有右倾的稀土配分模式(图 6a),Eu 异常在 0.77 到 0.95 之间。阿斯恰套岩体的稀土元素总量($\Sigma REE = 45.3 \times 10^{-6} \sim 81.7 \times 10^{-6}$)显著低于其他样品($\Sigma REE = 113.8 \times 10^{-6} \sim 198.6 \times 10^{-6}$),轻重稀土分异程度也弱于其他样品,前者 $(La/Yb)_N$ 比值在 3.2 ~3.6 之间,而后者在 4.8 ~14.2 之间,尤其是杜洛埃岩体北部样品的重稀土配分模式呈下凹的勺子状(图 6a)。

5.3 Sr-Nd 同位素

选取哈拉尔次岩体和杜洛埃岩体的 5 件样品进行了 Sr-Nd 同位素测试,分析结果见表 2。所有样品 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 比值在 0.670 ~4.187 之间,具有相似且相对较高的初始锶比值(I_{Sr} = 0.7050 ~0.7098)。$\varepsilon_{Nd}(t)$ 值相对集中且较低,介于 -2.0 ~ +0.5 之间。所有样品的 $f_{Sm/Nd}$ 值介于 -0.41 ~ -0.24 之间,说明岩浆可能经历了轻微程度的分异,导致偏离平均地壳(-0.40)的范围,因此在模式年龄计算中 $f_{Sm/Nd}$ 值大于 -0.30 的 2 件样品选用二阶段模式年龄,其余 3 件样品选用单阶段模式年龄,计算的模式年龄结果在 1.6 ~1.2Ga 之间(表 2)。

表 1 阿尔泰乌希里克地区岩浆岩主量(wt%)和微量($\times10^{-6}$)元素测试结果

Table 1 Major (wt%) and trace element ($\times10^{-6}$) concentration of the magmatite from Wuxilike area in Chinese Altay

样品号	PM29-YQ1	PM29-YQ3	9008-GS1	WX1-YQ1	WX1-YQ2	WX1-YQ3	WX1-YQ4	PM5-GS20	PM5-GS5	D3872-YQ1	D3872-YQ2
岩体	杜洛埃岩体			阿斯套恰岩体				哈拉尔次岩体		英安斑岩	
SiO_2	69.09	72.19	65.82	56.20	56.91	52.14	52.44	67.12	66.37	66.50	66.21
Al_2O_3	15.20	13.36	15.81	16.32	15.72	16.99	17.18	15.07	15.79	13.66	13.76
Fe_2O_3	0.64	0.80	7.21	2.15	2.03	1.52	1.38	4.32	4.42	0.97	0.96
FeO	2.85	2.24	2.68	4.87	4.56	5.26	5.08	3.05	3.05	4.93	4.99
MgO	1.50	1.43	2.66	5.77	6.34	9.02	9.01	1.42	1.55	3.72	3.75
CaO	3.26	1.99	1.08	6.97	7.76	8.56	8.37	2.46	2.86	2.23	2.22
Na_2O	3.56	2.71	2.24	2.25	2.13	1.86	1.88	3.05	3.28	2.34	2.40
K_2O	1.73	3.11	2.72	1.79	1.33	0.87	0.98	4.18	3.77	2.96	3.00
TiO_2	0.52	0.41	0.40	0.78	0.64	0.51	0.42	0.65	0.66	0.80	0.79
P_2O_5	0.43	0.32	0.09	0.15	0.12	0.11	0.09	0.16	0.16	0.15	0.15
MnO	0.05	0.04	0.11	0.13	0.13	0.13	0.12	0.07	0.07	0.09	0.09
LOI	1.09	1.30		2.50	2.22	2.91	2.91			1.53	1.55
Total	99.92	99.90	100.81	99.88	99.89	99.88	99.86	101.55	101.98	99.88	99.87
$Mg^{\#}$	48	53	64	68	71	75	76	45	48	57	57
Na_2O/K_2O	2.06	0.87	0.82	1.26	1.60	2.14	1.92	0.73	0.87	0.79	0.80
A/CNK	1.11	1.17	1.84	0.89	0.83	0.87	0.89	1.08	1.08	1.23	1.23
A/NK	1.97	1.71	2.39	2.89	3.18	4.25	4.14	1.58	1.67	1.94	1.91
K	14400	25800	22600	14900	11000	7200	8100	34700	31300	24600	24900
Ba	200	411	567	253	218	127	144	475	453	411	456
Cs	7.80	6.08	4.08	5.87	3.35	3.66	4.22	12.53		14.00	15.40
Hf	4.34	3.74	4.06	2.09	1.68	1.48	1.32	5.66	5.537	5.02	4.53
Nb	8.61	8.95	6.64	5.59	5.32	3.55	3.20	12.57	11.69	10.00	9.66
Rb	94.2	89.1	53.2	83.8	62.9	41.7	45.4	178	159	116	141
Sr	247	142	236	155	142	157	168	125	150	284	305
Ta	0.66	0.70	0.80	0.45	0.34	0.25	0.20	1.22	1.16	0.56	0.59
Th	7.16	12.40	8.88	4.74	4.33	1.85	2.08	15.62	14.65	12.00	13.00
U	1.68	1.60	1.01	1.01	1.21	0.56	0.67	2.16	1.76	1.50	1.58
Zr	151	123	150	63.9	49.9	50.0	41.6	200	198	170	158
Y	27.60	16.00	13.81	21.50	21.60	11.90	12.60	50.03	46.04	25.90	24.60
La	19.60	24.60	24.25	12.20	12.10	6.92	7.06	31.54	32.24	34.80	42.00
Ce	42.60	53.20	50.75	28.90	28.90	16.80	16.20	68.32	71.11	71.00	85.50
Pr	5.17	6.54	5.82	3.72	3.78	2.22	2.10	8.37	8.54	7.76	9.41
Nd	20.20	23.50	22.20	15.80	15.80	9.31	8.29	33.00	32.98	28.20	34.40
Sm	4.78	5.26	4.51	3.94	4.11	2.51	2.10	7.90	7.65	6.26	7.37
Eu	1.49	1.05	1.11	1.11	0.91	0.77	0.66	1.34	1.45	1.36	1.64
Gd	5.36	4.93	3.54	4.48	4.57	2.62	2.39	7.39	7.38	5.70	6.46
Tb	0.90	0.71	0.47	0.73	0.74	0.41	0.36	1.32	1.23	0.84	0.93
Dy	5.57	3.69	2.71	4.30	4.51	2.59	2.38	8.45	7.85	4.62	4.81
Ho	1.16	0.70	0.47	0.88	0.95	0.55	0.50	1.77	1.61	0.84	0.89
Er	3.23	1.76	1.24	2.50	2.69	1.56	1.44	5.12	4.7	2.24	2.39
Tm	0.46	0.25	0.20	0.37	0.41	0.24	0.20	0.76	0.68	0.33	0.34
Yb	2.84	1.62	1.23	2.40	2.58	1.55	1.41	4.66	4.39	2.14	2.19
Lu	0.40	0.25	0.21	0.36	0.38	0.24	0.21	0.71	0.68	0.32	0.32
$(La/Yb)_N$	4.95	10.9	14.2	3.65	3.36	3.20	3.59	4.85	5.27	11.7	13.8

表 2 阿尔泰乌希里克地区岩浆岩 Sr-Nd 同位素测试结果

Table 2 Sr-Nd isotope compositions for the magmatite from Wuxilike area in Chinese Altay

岩体	样品号	时代(Ma)	Rb/Sr (×10⁻⁶)	Sr/Rb	$\left(\frac{^{87}Rb}{^{86}Sr}\right)_s$	$\left(\frac{^{87}Sr}{^{86}Sr}\right)_s$	2σ	$\left(\frac{^{87}Sr}{^{86}Sr}\right)_t$	Sm/Nd (×10⁻⁶)	Nd/Sm	$\left(\frac{^{147}Sm}{^{144}Nd}\right)_s$	$\left(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd}\right)_s$	2σ	$\left(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd}\right)_t$	$\left(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd}\right)_{chur,t}$	$\varepsilon_{Nd}(t)$	t_{DM}(Ma)	t_{DM2}(Ma)	$f_{Sm/Nd}$
哈拉尔次	PM5-GS5	455	161.3	144.8	3.2288	0.728359	11	0.707430	7.34	32.65	0.1361	0.512357	9	0.511951	0.512052	-2.0	1559	1351	-0.31
	PM5-GS20		181.5	125.8	4.1870	0.732172	14	0.705032	7.95	33.80	0.1423	0.512425	12	0.512001	0.512052	-1.0	1549	1271	-0.28
	PM6-GS4		167.4	149.8	3.2402	0.726449	11	0.705446	10.41	42.34	0.1488	0.512519	11	0.512075	0.512052	0.5	1484	1154	-0.24
	PM6-GS15		153.7	152.3	2.9278	0.725822	15	0.706844	8.94	42.01	0.1288	0.512393	10	0.512010	0.512052	-0.8	1359	1258	-0.35
杜洛埃	9008-GS1	464	52.84	228.6	0.6696	0.714250	15	0.709823	4.41	22.99	0.1161	0.512330	10	0.511977	0.512040	-1.2	1282	1299	-0.41

注:$\varepsilon_{Nd}(t)=[(^{143}Nd/^{144}Nd)_s/(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}-1]\times 10000$, $f_{Sm/Nd}=(^{147}Sm/^{144}Nd)_s/(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR}-1$, $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR}=0.512638$, $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}=0.1967$, $t_{DM}=1/\lambda\times\ln[1+[(^{143}Nd/^{144}Nd)_s-0.51315]/[(^{147}Sm/^{144}Nd)_s-0.2137]]$, $t_{DM2}=(t_{DM}-(t_{DM}-t)(f_{cc}-f_s))/(f_{cc}-f_{dm})$

6 讨论

6.1 哈巴河群时代

哈巴河群在20世纪60年代出版的1∶20万区域地质图中被划入中-晚奥陶世,而后来根据古生物化石证据又被划入新元古代文德期(彭昌文,1989)。新疆维吾尔自治区地质矿产局(1993)曾主张解体哈巴河群,但是 Windley *et al.*(2002)根据大理岩中的微体古生物化石又建议将解体的哈巴河群重新恢复,可见哈巴河群的时代问题尚存在巨大的争议。本文测试结果表明乌希里克地区哈巴河群中的英安岩形成于482±5Ma,斜长角闪岩(原岩恢复为碱性玄武岩)形成于486±7Ma,为奥陶纪初期火山喷发的产物,因此至少在乌希里克一带该套地层应归属于早奥陶世。Long *et al.*(2010)对哈巴河群不同地点的复理石建造中的碎屑锆石研究表明,阿尔泰西北部的碎屑锆石年龄集中在500~438Ma之间,东南部在540~460Ma之间,而覆盖在哈巴河群之上的东锡勒克组流纹岩年龄为411Ma,因此认为哈巴河群的年龄最老应该是早志留世(西北部)或中奥陶世(东南部),但不会晚于早泥盆世(411Ma)。这一结论与本文得到的哈巴河群中的火山岩(~480Ma)夹层,以及侵入其中的中-晚奥陶世花岗岩(~460Ma)的年龄不完全一致,也反应出"哈巴河群"非常宽泛的年龄范围。

值得注意的是,哈巴河群几乎遍布中国阿尔泰造山带的核心地区,从西北国境一直延伸至东南东准噶尔以北地区,而以上关于哈巴河群时代的研究地点也分散于各处,各自有其证据但又相互矛盾。此外,哈巴河群变质沉积物的 Sr-Nd 同位素组成具有富集型古老地壳的特征,如 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为-5.0~-3.4、初始锶比值为0.710~0.712、Nd 模式年龄为1.5~1.8Ga 等(Chen and Jahn,2002)。现有的证据表明哈巴河群中可能存在晚元古代末期到早志留世的地层,在开展1∶5万区域地质调查过程中也识别出一套寒武系地层,这一巨大时间跨度显然不适合用于描述一个单一的地层单元,将哈巴河群解体细化具有很大的必要性,但这还需要进一步的详细研究。

6.2 岩石成因

侵入乌希里克地区哈巴河群中的阿斯恰套岩体、杜洛埃岩体和哈拉尔次岩体形成于中晚奥陶世(464~451Ma),形成时代略晚于哈巴河群中的火山岩。地球化学特征方面,这些侵入岩和喷出岩均属钙碱性到高钾钙碱性系列,从准铝质到过铝质(图5),杜洛埃岩体和阿斯恰套岩体富 Na 而贫 K(表1);所有样品具有相似的右倾型稀土配分模式,尤其是杜洛埃岩体北部的样品具有非常强的轻重稀土分异($(La/Yb)_N=14.2$,表1),中重稀土强烈亏损呈现上凹的"勺子状"配分模式(图6a)。所有样品均亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素,富集 K、Rb、Ba 等大离子亲石元素(图6b)。这些侵入

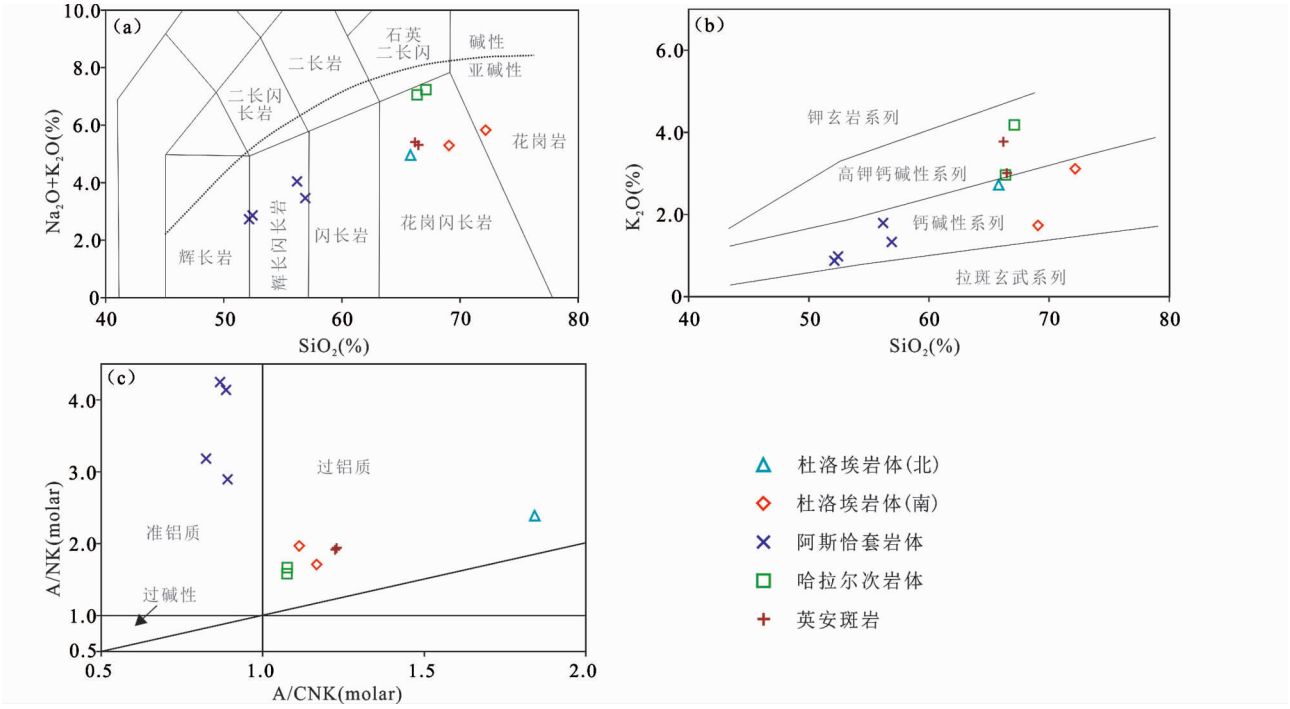


图 5 乌希里克地区岩浆岩分类图解

(a) TAS 图解; (b) K_2O-SiO_2 图解; (c) A/NK-A/CNK 图解

Fig. 5 Classification and discrimination diagrams of rocks from this study

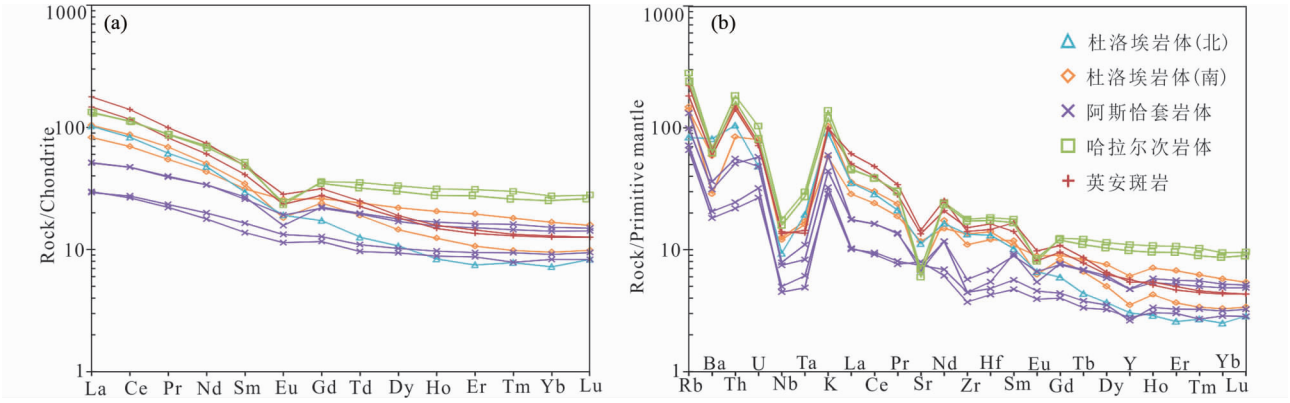


图 6 乌希里克岩浆岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b) of the igneous rocks in Wuxilike (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

岩多含黑云母和角闪石,类似于 I 型花岗岩的特征。以上多方面的特征指示乌希里克地区奥陶纪的岩浆岩具有弧岩浆的地球化学特征,但是哈拉尔次岩体和英安岩显示富 K 而贫 Na 的特征,Na_2O/K_2O 值在 0.73 ~ 0.87 之间(表 1),除阿斯恰套岩体以外都显示富 Al 特征,这又不同于典型的岛弧岩浆岩,而具有壳源花岗岩的特征。英安岩的锆石测年结果显示,火山岩中存在从早元古代到晚元古代的继承性锆石(图 4f、表 1),指示可能有前寒武纪物质参与岩浆岩的形成。

Sr-Nd 同位素测试结果表明哈拉尔次岩体和杜洛埃岩体具有较高的初始锶比值(I_{Sr} = 0.7050 ~ 0.7098),$\varepsilon_{Nd}(t)$ 值除哈拉尔次岩体的一个样品(PM6-GS4)为 +0.5 以外,其余四件样品的值在 -2.0 ~ -0.8 之间,以及 1.2 ~ 1.6Ga 的 Nd 模式年龄都指示有老地壳物质的加入,演化的大陆地壳物质可能是这些奥陶纪岩浆岩的重要物源。与哈巴河群变质沉积岩 Sr-Nd 同位素指标相比(Chen and Jahn, 2002),本文研究的奥陶纪花岗质岩石具有相对低的初始锶比值、相对高的

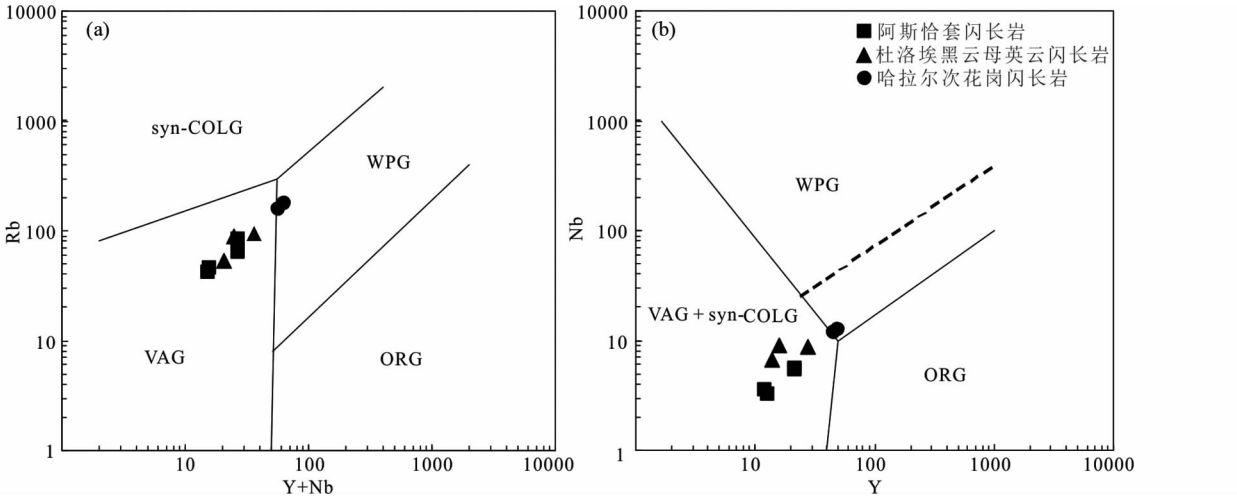


图 7 乌希里克岩浆岩(Y + Nb)-Rb (a)和 Y-Nb (b)构造环境判别图(底图据 Pearce *et al.*,1984)

Fig. 7 Discrimination diagrams of (Y + Nb) vs. Rb (a) and Y vs. Nb (b) (base map after Pearce *et al.*, 1984)

$\varepsilon_{Nd}(t)$值和相对年轻的 Nd 模式年龄,以及哈拉尔次岩体中 +0.5 的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值都指示除古老地壳物质以外还存在地幔物质或新生地壳物质的加入。此外,较高的 $Mg^{\#}$也指示了地幔物质的加入(表 1;Rapp and Watson, 1995)。因此,乌希里克地区奥陶纪火山岩和侵入岩的源区很可能包括古老地壳和地幔物质或新生地壳。

6.3 大地构造背景

关于阿尔泰地区早古生代的大地构造背景最大的争论是是否存在前寒武纪微陆块,存在被动(何国琦等,1990)或活动大陆边缘(Xiao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006; Long *et al.*, 2007, 2010)、与俯冲作用相关的增生楔或岛弧(Sengör and Natal'in, 1996; Windley *et al.*, 2002)两种观点。尽管阿尔泰地区原来被认为是前寒武纪基底的变质岩近来被证实属于早古生代,其中的锆石年龄集中在 528 ~ 466Ma 之间(Cai *et al.*, 2011),与该区哈巴河群岩石的碎屑锆石年龄分布也比较一致(Long *et al.*, 2010),但不可否认的是阿尔泰地区的地质体中含有大量前寒武纪的地质信息,如斜长石的 Pb 模式年龄(1286 ~ 2483Ma;曲国胜和崇美英,1991)、哈巴河群碎屑锆石中的前寒武纪年龄(Long *et al.*, 2010)和阿尔泰地区岩浆岩中的继承性锆石(宋国学等,2010; Yang *et al.*, 2014; 本文,图 4f)等,这些具有前寒武纪年龄的物质可能是远距离搬运沉积的,也可能来自未出露的前寒武纪基底。哈拉尔次岩体和杜洛埃岩体富集的 Sr-Nd 同位素特征暗示了这种古老地壳(或地块)的存在,更广泛的 Nd 同位素填图也指示在中国阿尔泰核心区域存在古老的地壳组分(Wang *et al.*, 2009)。

除乌希里克地区外,中国阿尔泰其它地区也广泛存在奥陶纪的岩浆作用,如 462Ma 的且末尔切克花岗岩(Wang *et al.*, 2006)和 462 ~ 458Ma 的阿巴宫-铁木尔特花岗岩(刘锋等,2009;柴凤梅等,2010)。另外,在中国阿尔泰造山带南缘明显占主导地位的泥盆纪岩浆岩(图 1)中也包含了大量的早古生代继承锆石(Yang *et al.*, 2014),说明奥陶纪时期的岩浆事件是广泛存在的。

在花岗岩类构造环境判别图(Pearce *et al.*, 1984, 图 7)上,阿斯恰套岩体、杜洛埃岩体和哈拉尔次岩体主要集中在岛弧型花岗岩区域,结合上文讨论的岩石成因,可以认为:奥陶纪时期,中国阿尔泰地区的构造背景可能属于与俯冲相关的活动大陆边缘,其在早古生代的构造演化与额尔齐斯-斋桑洋的扩张、俯冲有关(Xiao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006)。哈巴河群中的火山岩夹层、奥陶纪中、晚期的花岗岩类均是这一构造背景下不同演化阶段的产物。

7 结论

阿勒泰市西北乌希里克地区哈巴河群浅变质岩中的英安岩和斜长角闪岩的原岩喷出时间分别为 480 ± 7Ma 和 482 ± 5Ma。乌希里克地区原来划归到中-上奥陶统的哈巴河群应属于下奥陶统,结合整个阿尔泰地区哈巴河群的文献资料建议解体哈巴河群。乌希里克一带的阿斯恰套岩体、杜洛埃岩体和哈拉尔次岩体分别侵位于 461 ± 2Ma、452 ± 5Ma、455 ± 3Ma,属中-晚奥陶世,略晚于围岩。与火山岩一起,这些岩浆岩具有弧岩浆岩的岩石组合和地球化学特征,同时具有明显的古老大陆地壳混染的特征,它们形成于活动大陆边缘环境,是额尔齐斯-斋桑洋扩张、俯冲过程的产物,这一俯冲岩浆事件在奥陶纪初期可能就已经广泛存在。

致谢 野外工作中得到了中国人民武装警察部队黄金部队第八支队赵军、曾祥武、摆翔、章享云、霍东亮、张鹏伟、卢乐、蔺如喜等人的支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。同时

感谢责任编辑和三位评审老师在审稿过程中提出的宝贵意见!

References

Anderson T. 2002. Correction of common lead Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chemical Geology, 192(1-2): 59-79

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomy Region. 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomy Region. Beijing: Geological Publishing House, 1-667 (in Chinese)

Cai KD, Sun M, Yuan C, Long XP and Xiao WJ. 2011. Geological framework and Paleozoic tectonic history of the Chinese Altai, NW China: A review. Russian Geology and Geophysics, 52(12): 1619-1633

Chai FM, Dong LH, Yang FQ, Liu F, Geng XX and Huang CK. 2010. Age, geochemistry and petrogenesis of Tiemierte granites in the Kelang basin at the southern margin of Altay, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 377-386 (in Chinese with English abstract)

Chen B and Jahn BM. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications. Geological Magazine, 139(1): 1-13

Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Zhang L. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1077-1086 (in Chinese with English abstract)

He GQ, Han BF, Yue YJ and Wang JH. 1990. Tectonic division and crustal evolution of Altay Orogenic Belt in China. Xinjiang Geoscience, (2): 9-20 (in Chinese)

Hu AQ, Jahn BM, Zhang GX, Chen YB and Zhang QF. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotope evidence. Part 1. Isotopic characterization of basement rocks. Tectonophysics, 328(1-2): 15-51

Li CF, Li XH, Li QL, Guo JH, Li XH and Yang YH. 2012. Rapid and precise determination of Sr and Nd isotopic ratios in geological samples from the same filament loading by thermal ionization mass spectrometry employing a single-step separation scheme. Analytica Chimica Acta, 727: 54-60

Li CF, Chu ZY, Guo JH, Li YL, Yang YH and Li XH. 2015. A rapid single column separation scheme for high-precision Sr-Nd-Pb isotopic analysis in geological samples using thermal ionization mass spectrometry. Analytical Methods, 7(11): 4793-4802

Liu F, Yang FQ, Mao JW, Chai FM and Geng XX. 2009. Study on chronology and geochemistry for Abagong granite in Altay Orogen. Acta Petrologica Sinica, 25(6): 1416-1425 (in Chinese with English abstract)

Long XP, Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Lin SF, Wu FY, Xia XP and Cai KD. 2007. U-Pb and Hf isotopic study of zircons from metasedimentary rocks in the Chinese Altai: Implications for Early Paleozoic tectonic evolution. Tectonics, 26(5): TC5015

Long XP, Yuan C, Sun M, Xiao WJ, Zhao GC, Wang YJ, Cai KD, Xia XP and Xie LW. 2010. Detrital zircon ages and Hf isotopes of the Early Paleozoic flysch sequence in the Chinese Altai, NW China: New constrains on depositional age, provenance and tectonic evolution. Tectonophysics, 480(1-4): 213-231

Lou FS. 1997. Characteristics of Late Caledonian granite in the Nuoerte area, Altay. Jiangxi Geology, 11(3): 60-66 (in Chinese with English abstract)

Ludwig KR. 2012. User's Manual for Isoplot 3.75: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center

Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25(4): 956-983

Peng CW. 1989. Discovery and geological significance of micropaleoflora from the Habahe Group in Baikaba district of Xinjiang. Xinjiang Geology, 7(4): 19-23 (in Chinese with English abstract)

Qu GS and Chong MY. 1991. Lead isotope geology and its tectonic implications in Altaides, China. Geoscience, 5(1): 100-110 (in Chinese with English abstract)

Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8 ~ 32kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. Journal of Petrology, 36(4): 891-931

Sengör AMC, Natal'in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 364: 299-307

Sengör AMC and Natal'in BA. 1996. Turkic-type orogeny and its role in the making of the continental crust. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 24(1): 263-337

Song GX, Qin KZ, Liu TB, Li GM and Shen P. 2010. The U-Pb ages, Hf isotope and REE patterns of older zircons from Devonian volcanic rocks in Ashele basin on the southern margin of Altai orogen and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 26(10): 2946-2958 (in Chinese with English abstract)

Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Long XP, Xia XP, Zhao GC, Lin SF, Wu FY 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

Sun M, Long XP, Cai KD, Jiang YD, Wang BY, Yuan C, Zhao GC, Xiao WJ and Wu FY. 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 SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saundern AD and Norry MJ (eds). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313-345

Tong Y, Wang T, Kovach VP, Hong DW and Han BF. 2006. Age and origin of the Takeshiken postorogenic alkali-rich intrusive rocks in southern Altai, near the Mongolian border in China and its implications for continental growth. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1267-1278 (in Chinese with English abstract)

Tong Y, Wang T, Jahn BM, Sun M, Hong DW and Gao JF. 2014. Post-accretionary Permian granitoids in the Chinese Altai Orogen: Geochronology, petrogenesis and tectonic implications. American Journal of Science, 314(1): 80-109

Wang DH, Chen YC, Xu ZG, Li TD and Fu XJ. 2002. Mineraogeneticseries of Mineral Deposits and Regularity of Mineralization in the Altai Metallogenic Province, Xinjiang, China. Beijing: Atomic Energy Press, 1-498 (in Chinese)

Wang T, Hong DW, Jahn BM, Tong Y, Wang YB, Han BF and Wang XX. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. The Journal of Geology, 114(6): 735-751

Wang T, Jahn BM, Kovach VP, Tong Y, Hong DW and Han BF. 2009. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt. Lithos, 110(1-4): 359-372

Wang ZG, Zhao ZH and Zou TR. 1998. Geochemistry of the Granitoids in Altay. Beijing: Science Press, 1-152 (in Chinese)

Windley BF, Kröner A, Gui JH, Qu GS, Li YY 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

Windley BF, Alexeiev D, Xiao WJ, Kröner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. Journal of the Geological Society, 164(1): 31-47

Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li J, Qin K and Wang Z.

2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of central Asia. Journal of the Geological Society, 161(3): 339 – 342

Xiao WJ, Windley BF, Yuan C, Sun M, Han CM, Lin SF, Chen HL, Yan QR, Liu DY, Qin KZ, Li JL and Sun S. 2009. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids. American Journal of Science, 309(3): 221 – 270

Yang FQ, Liu F, Li Q and Geng XX. 2014. In situ LA-MC-ICP-MS U-Pb geochronology of igneous rocks in the Ashele Basin, Altay orogenic belt, Northwest China: Constraints on the timing of polymetallic copper mineralization. Journal of Asian Earth Sciences, 79: 477 – 496

Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Günther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. Geostandards and Geoanalytical Research, 28(3): 353 – 370

Zhang HX, Niu HC, Terada K, Yu XY, Sato H and Ito J. 2003. Zircon SHRIMP U-Pb dating on plagiogranite from Kuerti ophiolite in Altay, North Xinjiang. Chinese Science Bulletin, 48(20): 2231 – 2235

Zhao ZH, Wang ZG, Zou TR and Masuda A. 1993. The REE, isotopic composition of O, Pb, Sr and Nd and petrogenesis of granitoids in the Altai region. In: Tu GC (ed). Progress of Solid-Earth Sciences in Northern Xinjiang, China. Beijing: Science Press, 239 – 266 (in Chinese)

Zheng JH, Chai FM and Yang FQ. 2016. The 401 ~ 409Ma Xiaodonggou granitic intrusion: Implications for understanding the Devonian tectonics of the Northwest China Altai orogen. International Geology Review, 58(5): 540 – 555

附中文参考文献

柴凤梅, 董连慧, 杨富全, 刘锋, 耿新霞, 黄承科. 2010. 阿尔泰南缘克朗盆地铁木尔特花岗岩体年龄、地球化学特征及成因. 岩石学报, 26(2): 377 – 386

韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I): 后碰撞深成岩浆活动的时限. 岩石学报, 22(5): 1077 – 1086

何国琦, 韩宝福, 岳永君, 王嘉桁. 1990. 中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化. 新疆地质科学, (2): 9 – 20

刘锋, 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 耿新霞. 2009. 阿尔泰造山带阿巴宫花岗岩体年代学及地球化学研究. 岩石学报, 25(6): 1416 – 1425

楼法生. 1997. 阿尔泰诺尔特地区加里东晚期花岗岩特征. 江西地质, 11(3): 60 – 66

彭昌文. 1989. 新疆白哈巴地区哈巴河群的微古植物及其地层意义. 新疆地质, 7(4): 19 – 23

曲国胜, 崇美英. 1991. 阿尔泰造山带的铅同位素地质及其构造意义. 现代地质, 5(1): 100 – 110

宋国学, 秦克章, 刘铁兵, 李光明, 申萍. 2010. 阿尔泰南缘阿舍勒盆地泥盆纪火山岩中古老锆石的 U-Pb 年龄、Hf 同位素和稀土元素特征及其地质意义. 岩石学报, 26(10): 2946 – 2958

童英, 王涛, Kovach VP, 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

王登红, 陈毓川, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律. 北京: 原子能出版社, 1 – 498

王中刚, 赵振华, 邹天人. 1998. 阿尔泰花岗岩类地球化学. 北京: 科学出版社, 1 – 152

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, 1 – 667

赵振华, 王中刚, 邹天人, 增田章. 1993. 阿尔泰花岗岩类 REE 及 O, Pb, Sr, Nd 同位素组成及成岩模型. 见: 涂光炽编. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 239 – 266

附表 1　阿尔泰乌希里克地区岩浆岩锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年代学数据

Appendix Table 1　LA-ICP-MS U-Pb isotopic data of magmatic zircons from Wuxilike area in Chinese Altay

测点号	Th ($\times10^{-6}$)	U ($\times10^{-6}$)	Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 比值	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$ 比值	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$ 比值	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄(Ma)	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$ 年龄(Ma)	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(Ma)	1σ	谐和度
阿斯恰套(WX1-TW1)																
1	253	537	0.47	0.0554	0.0025	0.5737	0.0261	0.0748	0.0010	428	100.0	460	16.8	465	6.2	99%
2	419	608	0.69	0.0557	0.0023	0.5724	0.0244	0.0745	0.0011	439	94.4	460	15.7	463	6.5	99%
3	689	792	0.87	0.0557	0.0022	0.5723	0.0224	0.0742	0.0009	439	90.7	460	14.4	462	5.2	99%
4	172	301	0.57	0.0559	0.0036	0.5706	0.0381	0.0739	0.0013	450	144	458	24.6	459	7.8	99%
5	313	426	0.74	0.0566	0.0031	0.5722	0.0302	0.0742	0.0011	476	122	459	19.5	461	6.6	99%
6	424	502	0.84	0.0555	0.0024	0.5750	0.0252	0.0743	0.0010	432	96.3	461	16.2	462	5.8	99%
7	190	327	0.58	0.0589	0.0037	0.6067	0.0363	0.0746	0.0011	565	138	481	23.0	464	6.4	96%
8	431	529	0.81	0.0558	0.0027	0.5754	0.0268	0.0748	0.0010	443	109	462	17.3	465	6.0	99%
9	381	452	0.84	0.0558	0.0029	0.5718	0.0295	0.0741	0.0009	456	121	459	19.1	461	5.4	99%
10	381	452	0.84	0.0559	0.0029	0.5686	0.0293	0.0738	0.0009	450	116.7	457	19.0	459	5.2	99%
11	629	714	0.88	0.0560	0.0023	0.5714	0.0227	0.0743	0.0009	454	86.1	459	14.7	462	5.1	99%
12	467	563	0.83	0.0559	0.0024	0.5757	0.0245	0.0748	0.0008	456	94.4	462	15.8	465	5.0	99%
13	165	314	0.53	0.0568	0.0034	0.5698	0.0333	0.0739	0.0011	483	133	458	21.5	460	6.9	99%
14	980	1083	0.91	0.0618	0.0022	0.6290	0.0226	0.0737	0.0009	733	75.9	495	14.1	459	5.3	92%
15	666	800	0.83	0.0563	0.0023	0.5703	0.0236	0.0737	0.0008	465	92.6	458	15.3	458	5.0	99%
16	465	648	0.72	0.0610	0.0027	0.6264	0.0275	0.0746	0.0009	639	94.4	494	17.2	464	5.4	93%
17	289	542	0.53	0.0555	0.0028	0.5684	0.0287	0.0743	0.0009	432	108	457	18.6	462	5.3	98%
18	411	680	0.61	0.0588	0.0023	0.5980	0.0237	0.0737	0.0008	561	85.2	476	15.0	459	5.0	96%
19	321	664	0.48	0.0575	0.0024	0.5857	0.0230	0.0743	0.0008	509	90.7	468	14.7	462	4.8	98%
20	507	622	0.82	0.0555	0.0027	0.5658	0.0264	0.0742	0.0009	432	109	455	17.1	461	5.2	98%
21	472	710	0.67	0.0561	0.0023	0.5693	0.0229	0.0736	0.0008	454	90.7	458	14.8	458	5.0	99%
杜洛埃(9008-TW1)																
1	456	536	0.85	0.0560	0.0022	0.6300	0.0250	0.0809	0.0009	450	119	496	16	501	6	98%
2	176	531	0.33	0.0551	0.0020	0.5684	0.0209	0.0741	0.0008	417	81	457	14	461	5	99%
3	351	562	0.62	0.0575	0.0025	0.6430	0.0299	0.0806	0.0011	509	101	504	18	500	7	99%
4	869	1150	0.76	0.0546	0.0015	0.5701	0.0157	0.0749	0.0006	394	63	458	10	466	4	98%
5	304	785	0.39	0.0562	0.0024	0.6111	0.0267	0.0786	0.0009	461	94	484	17	488	6	99%
6	583	810	0.72	0.0564	0.0019	0.6127	0.0197	0.0784	0.0008	478	74	485	12	487	5	99%
7	1335	1399	0.95	0.0552	0.0020	0.5712	0.0213	0.0746	0.0008	420	79	459	14	464	5	98%
8	770	1790	0.43	0.0561	0.0016	0.6102	0.0169	0.0782	0.0008	457	61	484	11	486	5	99%
9	1714	1972	0.87	0.0554	0.0015	0.5717	0.0152	0.0744	0.0007	428	68	459	10	462	4	99%
10	140	421	0.33	0.0575	0.0026	0.5879	0.0260	0.0742	0.0009	522	102	470	17	461	6	98%
11	452	887	0.51	0.0563	0.0018	0.6165	0.0194	0.0790	0.0008	465	105	488	12	490	5	99%
12	154	462	0.33	0.0810	0.0039	0.8811	0.0471	0.0769	0.0011	1222	95	642	25	477	6	70%
13	16	587	0.03	0.0560	0.0041	0.6224	0.0502	0.0809	0.0016	454	161	491	31	501	9	98%
14	36	263	0.14	0.0699	0.0050	0.3075	0.0201	0.0328	0.0006	926	146	272	16	208	4	73%
15	115	311	0.37	0.0561	0.0030	0.6371	0.0349	0.0826	0.0011	457	114	500	22	512	7	97%
16	241	1144	0.21	0.0542	0.0020	0.2474	0.0089	0.0329	0.0003	389	81	224	7	209	2	92%
17	1768	1479	1.20	0.0550	0.0017	0.5722	0.0172	0.0749	0.0008	409	67	459	11	466	5	98%
18	171	2397	0.07	0.0583	0.0016	0.6663	0.0230	0.0812	0.0012	539	59	518	14	503	7	97%
19	960	2076	0.46	0.0559	0.0015	0.5808	0.0143	0.0750	0.0007	450	59	465	9	466	4	99%
20	1352	1104	1.22	0.0560	0.0016	0.6097	0.0170	0.0785	0.0007	450	68	483	11	487	4	99%
杜洛埃(PM29-TW1)																
1	1343	3201	0.42	0.0554	0.00126	0.5598	0.01497	0.0733	0.00188	428	49.37	451.4	9.75	456	11.32	99%
2	749	1254	0.60	0.05568	0.00133	0.56189	0.01552	0.07319	0.0019	439.5	52.02	452.8	10.09	455.3	11.39	99%
3	2107	3082	0.68	0.05581	0.00123	0.56763	0.01488	0.07376	0.00189	444.7	47.8	456.5	9.64	458.8	11.32	99%
4	376	2782	0.14	0.05509	0.00116	0.54315	0.01393	0.07152	0.00182	415.6	45.89	440.5	9.17	445.3	10.93	99%
5	460	870	0.53	0.05356	0.00132	0.54289	0.0153	0.07351	0.00191	352.6	54.8	440.3	10.07	457.3	11.48	96%
6	1293	976	1.32	0.05558	0.00134	0.55586	0.01544	0.07254	0.00188	435.4	52.55	448.8	10.08	451.4	11.31	99%
7	498	410	1.21	0.05612	0.0017	0.56566	0.01839	0.07311	0.00199	456.7	66.16	455.2	11.93	454.9	11.95	100%

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	Th	U	Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		谐和度
	($\times10^{-6}$)			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ	
8	1407	2773	0.51	0.05613	0.00118	0.5647	0.01445	0.07297	0.00185	457.1	45.99	454.6	9.38	454	11.12	100%
9	1069	2847	0.38	0.05574	0.0012	0.56505	0.01463	0.07353	0.00187	441.7	46.86	454.8	9.49	457.4	11.23	99%
10	522	946	0.55	0.05506	0.00142	0.55557	0.0161	0.07318	0.00192	414.7	55.98	448.6	10.51	455.3	11.52	99%
11	1418	2458	0.58	0.05782	0.00131	0.57564	0.01534	0.07221	0.00185	522.7	49.11	461.7	9.89	449.5	11.13	100%
12	2748	2514	1.09	0.05731	0.00128	0.64954	0.01715	0.08221	0.0021	503	48.79	508.2	10.56	509.3	12.51	100%
13	4275	3187	1.34	0.06103	0.00132	0.80831	0.02094	0.09606	0.00244	640.5	45.78	601.5	11.76	591.3	14.37	102%
14	477	3171	0.15	0.05693	0.00122	0.57337	0.01481	0.07305	0.00185	488.2	46.78	460.2	9.56	454.5	11.14	101%
15	2383	6679	0.36	0.05706	0.00119	0.3911	0.00993	0.04972	0.00126	493.2	45.34	335.2	7.25	312.8	7.71	107%
16	1822	3317	0.55	0.05521	0.00177	0.55662	0.01878	0.07313	0.00201	420.5	69.43	449.3	12.25	455	12.1	99%
17	1858	2215	0.84	0.05721	0.00126	0.57258	0.01502	0.07259	0.00185	499.1	48.42	459.7	9.7	451.8	11.11	102%
18	506	980	0.52	0.05615	0.00146	0.56776	0.01655	0.07334	0.00192	458.1	56.87	456.6	10.72	456.2	11.55	100%
19	3142	8509	0.37	0.05586	0.00114	0.40598	0.0102	0.05272	0.00133	446.3	44.61	346	7.36	331.2	8.12	104%
20	359	2231	0.16	0.05583	0.00131	0.56202	0.01529	0.07301	0.00187	445.4	51.08	452.8	9.94	454.3	11.26	100%
21	80	1597	0.05	0.05533	0.0013	0.55816	0.01521	0.07318	0.00188	425.2	51.08	450.3	9.91	455.3	11.28	99%
22	2982	13170	0.23	0.05612	0.00115	0.37206	0.00933	0.04809	0.00121	456.8	44.55	321.2	6.9	302.8	7.43	106%
23	622	6186	0.10	0.05668	0.00118	0.37135	0.00942	0.04752	0.0012	478.4	45.98	320.7	6.98	299.3	7.37	107%
24	495	779	0.64	0.05736	0.00166	0.56582	0.01771	0.07155	0.00192	505.1	62.93	455.3	11.48	445.5	11.54	102%
25	1437	836	1.72	0.05564	0.00143	0.55837	0.01609	0.07279	0.0019	437.7	55.85	450.5	10.48	453	11.39	99%
26	2227	3749	0.59	0.05606	0.00124	0.52961	0.01385	0.06852	0.00174	454.5	48.03	431.5	9.2	427.2	10.48	101%
27	852	998	0.85	0.05459	0.0014	0.53968	0.01558	0.07171	0.00187	395.4	56.34	438.2	10.27	446.4	11.23	98%
28	359	909	0.39	0.05682	0.00136	0.56953	0.01566	0.07271	0.00187	483.7	52.03	457.7	10.13	452.5	11.23	101%
29	570	1024	0.56	0.056	0.00131	0.6981	0.01894	0.09042	0.00232	452.1	50.97	537.7	11.33	558	13.69	96%
30	311	2899	0.11	0.05495	0.00124	0.54395	0.01445	0.0718	0.00183	410.2	49.06	441	9.5	447	10.98	99%
哈拉尔次(PM5-TW20)																
1	223	533	0.42	0.0531	0.0026	0.5342	0.0252	0.0733	0.0011	332	111	435	17	456	6	95%
2	177	528	0.34	0.0583	0.0025	0.5889	0.0255	0.0731	0.0009	539	94	470	16	455	6	96%
3	267	1020	0.26	0.0568	0.0021	0.5681	0.0203	0.0725	0.0008	483	47	457	13	451	5	98%
4	148	947	0.16	0.0553	0.0022	0.5551	0.0208	0.0731	0.0009	433	87	448	14	455	5	98%
5	318	833	0.38	0.0571	0.0022	0.5858	0.0225	0.0746	0.0011	494	85	468	14	464	6	98%
6	297	941	0.32	0.0542	0.0021	0.5928	0.0236	0.0789	0.0010	389	82	473	15	490	6	96%
7	276	1969	0.14	0.0568	0.0017	0.5732	0.0178	0.0729	0.0007	483	69	460	11	454	4	98%
8	106	408	0.26	0.0547	0.0031	0.5497	0.0308	0.0727	0.0010	398	94	445	20	453	6	98%
9	94	937	0.10	0.0582	0.0021	0.5902	0.0217	0.0733	0.0008	600	80	471	14	456	5	96%
10	125	535	0.23	0.0543	0.0024	0.5466	0.0247	0.0727	0.0008	383	100	443	16	452	5	97%
11	254	647	0.39	0.0563	0.0022	0.5669	0.0216	0.0734	0.0008	465	85	456	14	457	5	99%
12	432	2553	0.17	0.0542	0.0013	0.5485	0.0138	0.0728	0.0006	389	57	444	9	453	4	98%
13	1211	9553	0.13	0.0549	0.0013	0.6126	0.0140	0.0803	0.0008	406	52	485	9	498	5	97%
14	555	2316	0.24	0.0709	0.0026	0.7207	0.0274	0.0728	0.0008	954	76	551	16	453	5	80%
15	203	1338	0.15	0.0539	0.0018	0.5504	0.0191	0.0732	0.0010	369	71	445	13	455	6	97%
16	782	798	0.98	0.0529	0.0019	0.5346	0.0194	0.0729	0.0009	324	83	435	13	454	5	95%
17	411	798	0.51	0.0618	0.0020	0.9824	0.0317	0.1146	0.0016	665	75	695	16	699	9	99%
18	217	856	0.25	0.0517	0.0019	0.5323	0.0205	0.0742	0.0009	272	92	433	14	461	6	93%
19	236	1174	0.20	0.0543	0.0017	0.5519	0.0174	0.0730	0.0008	383	64	446	11	454	5	98%
20	161	976	0.16	0.0559	0.0022	0.5668	0.0224	0.0727	0.0008	450	119	456	15	453	5	99%
21	492	679	0.73	0.0553	0.0025	0.5647	0.0252	0.0736	0.0010	433	102	455	16	458	6	99%
英安斑岩(D3872-TW1)																
1	68	61	1.12	0.06468	0.00192	1.15144	0.03652	0.12917	0.00365	764	61.27	777.9	17.23	783.2	20.83	98%
2	59	112	0.53	0.05244	0.00153	0.55678	0.01752	0.07704	0.00213	304.7	65.12	449.4	11.43	478.4	12.73	68%
3	312	889	0.35	0.06592	0.00127	1.42035	0.03432	0.15634	0.00405	804	39.96	897.5	14.4	936.4	22.56	90%
4	143	234	0.61	0.05466	0.00127	0.56373	0.01514	0.07484	0.00198	398.3	50.87	454	9.83	465.2	11.89	88%
5	365	439	0.83	0.05509	0.00116	0.58121	0.01474	0.07656	0.002	415.6	45.85	465.2	9.46	475.6	11.98	89%

续附表 1

Continued Appendix Table 1

测点号	Th ($\times10^{-6}$)	U ($\times10^{-6}$)	Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 比值	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 1σ	$^{207}Pb/^{235}U$ 比值	$^{207}Pb/^{235}U$ 1σ	$^{206}Pb/^{238}U$ 比值	$^{206}Pb/^{238}U$ 1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄(Ma)	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 1σ	$^{207}Pb/^{235}U$ 年龄(Ma)	$^{207}Pb/^{235}U$ 1σ	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(Ma)	$^{206}Pb/^{238}U$ 1σ	谐和度
6	85	124	0.68	0.05091	0.00141	0.54036	0.01637	0.07702	0.0021	236.6	62.68	438.7	10.79	478.3	12.55	54%
7	381	2614	0.15	0.05444	0.00103	0.40223	0.00961	0.05361	0.00138	389.2	41.78	343.3	6.96	336.7	8.45	113%
8	110	166	0.66	0.10396	0.00205	4.31895	0.10537	0.30144	0.00788	1696.1	35.97	1697	20.11	1698.4	39.05	100%
9	618	2293	0.27	0.05439	0.00104	0.42815	0.01026	0.05712	0.00147	387.1	42.19	361.9	7.3	358.1	8.98	107%
10	126	280	0.45	0.05178	0.00122	0.5644	0.01529	0.07909	0.0021	275.6	53.05	454.4	9.92	490.7	12.53	61%
11	169	259	0.65	0.05721	0.00138	0.61958	0.01696	0.07858	0.0021	499.3	52.61	489.6	10.63	487.6	12.53	102%
12	648	999	0.65	0.05144	0.00104	0.5709	0.01408	0.08053	0.00209	260.6	45.72	458.6	9.1	499.3	12.46	57%
13	130	339	0.38	0.05271	0.0012	0.56563	0.01497	0.07786	0.00205	316.4	50.85	455.2	9.71	483.3	12.29	70%
14	138	272	0.51	0.05123	0.00119	0.54306	0.01452	0.07691	0.00203	251.3	52.47	440.4	9.56	477.6	12.16	57%
15	73	234	0.31	0.05363	0.00128	0.57286	0.0156	0.0775	0.00206	355.5	53.13	459.9	10.07	481.2	12.33	77%
16	32	72	0.45	0.15353	0.00307	9.63486	0.23645	0.45532	0.01208	2385.7	33.66	2400.5	22.58	2418.9	53.52	99%
17	123	426	0.29	0.05227	0.0011	0.54562	0.01372	0.07574	0.00197	297.1	47.13	442.1	9.01	470.7	11.82	67%
18	226	609	0.37	0.05633	0.00112	0.60102	0.01464	0.07741	0.002	464.6	43.78	477.9	9.28	480.7	11.99	97%
19	88	82	1.07	0.05271	0.00177	0.56976	0.01981	0.07843	0.00224	316.1	74.51	457.9	12.81	486.8	13.39	69%
20	201	337	0.60	0.05394	0.00119	0.51823	0.01341	0.06971	0.00183	368.2	49.06	424	8.97	434.4	11.03	87%
21	80	163	0.49	0.05273	0.00144	0.60678	0.01805	0.08349	0.00227	317.3	60.72	481.5	11.41	516.9	13.53	66%
22	127	222	0.57	0.06049	0.00129	1.1197	0.02832	0.13429	0.00352	621.3	45.22	762.8	13.56	812.3	19.99	81%
23	65	123	0.53	0.05506	0.00169	0.594	0.01923	0.07827	0.0022	414.7	66.68	473.4	12.25	485.8	13.14	88%
24	282	353	0.80	0.05233	0.00114	0.56301	0.0144	0.07806	0.00204	299.7	48.66	453.5	9.36	484.5	12.21	66%
25	274	707	0.39	0.05249	0.00105	0.56087	0.01367	0.07752	0.00201	307	44.8	452.1	8.89	481.3	12	68%
26	260	266	0.98	0.05406	0.00127	0.583	0.01567	0.07823	0.00207	373.6	52.14	466.4	10.05	485.6	12.4	80%
27	99	166	0.60	0.05545	0.00203	0.59755	0.02208	0.07819	0.00231	430	79.31	475.7	14.04	485.3	13.83	90%
28	77	108	0.71	0.05155	0.00164	0.55607	0.01854	0.07825	0.00221	265.7	71.55	449	12.09	485.7	13.19	59%
29	109	183	0.60	0.05333	0.00136	0.56519	0.01602	0.07689	0.00207	342.7	57.38	454.9	10.39	477.5	12.37	75%
30	140	264	0.53	0.05502	0.00125	0.58915	0.01541	0.07768	0.00205	413.1	49.09	470.3	9.85	482.2	12.23	88%
31	49	80	0.61	0.06226	0.00166	1.16314	0.03388	0.13554	0.00372	682.9	55.88	783.4	15.91	819.4	21.09	87%
32	62	580	0.11	0.0508	0.00105	0.55093	0.01364	0.07868	0.00204	231.6	46.97	445.6	8.93	488.2	12.2	52%
33	185	285	0.65	0.05403	0.00134	0.58435	0.01617	0.07846	0.0021	372.2	54.65	467.3	10.36	486.9	12.53	80%
34	160	309	0.52	0.05333	0.00121	0.57016	0.0149	0.07756	0.00204	342.7	50.42	458.1	9.63	481.5	12.2	75%
35	109	282	0.39	0.05469	0.00122	0.5868	0.01517	0.07783	0.00204	400.1	48.42	468.8	9.71	483.1	12.21	85%
斜长角闪岩(ZPW-TW1)																
1	77	326	0.24	0.05354	0.0017	0.57746	0.02038	0.07823	0.00216	351.8	69.91	462.8	13.12	485.5	12.91	95%
2	131	255	0.51	0.05267	0.00203	0.48199	0.01986	0.06638	0.00186	314.5	85.63	399.4	13.61	414.3	11.26	96%
3	397	347	1.15	0.05555	0.00182	0.60166	0.02177	0.07855	0.00217	434.3	71.09	478.3	13.8	487.5	12.99	98%
4	292	257	1.14	0.05395	0.00196	0.58457	0.02298	0.0786	0.00219	368.6	79.58	467.4	14.73	487.8	13.11	96%
5	245	212	1.15	0.05449	0.00227	0.5898	0.02596	0.07852	0.00223	391.1	90.05	470.7	16.58	487.3	13.3	97%
6	44	170	0.26	0.05326	0.0024	0.54639	0.02577	0.07441	0.00213	339.9	98.67	442.6	16.92	462.7	12.78	96%
7	2016	709	2.84	0.05404	0.00144	0.58452	0.01819	0.07845	0.00214	372.7	58.8	467.4	11.65	486.9	12.76	96%
8	442	626	0.71	0.04957	0.0017	0.23858	0.00898	0.03491	0.00096	174.7	78.23	217.3	7.36	221.2	6	98%
9	227	187	1.21	0.05339	0.00221	0.57505	0.02524	0.07813	0.00221	345.2	90.82	461.3	16.27	484.9	13.19	95%
10	69	100	0.69	0.05838	0.003	0.62446	0.03306	0.07758	0.00228	544.2	108.6	492.6	20.66	481.6	13.65	102%
11	461	292	1.58	0.05565	0.00201	0.55555	0.02172	0.07241	0.00202	438	78.35	448.6	14.18	450.7	12.13	100%
12	256	255	1.00	0.05302	0.00178	0.56889	0.02103	0.07782	0.00215	329.6	74.5	457.3	13.61	483.1	12.85	95%
13	316	469	0.67	0.05273	0.00154	0.4854	0.0161	0.06677	0.00182	317	64.81	401.8	11	416.7	11.02	96%
14	116	453	0.26	0.05593	0.00184	0.48854	0.01775	0.06335	0.00175	449.4	71.58	403.9	12.11	396	10.6	102%
15	104	148	0.70	0.05304	0.00255	0.57245	0.02857	0.07828	0.00225	330.4	105.15	459.6	18.45	485.8	13.47	95%
16	713	548	1.30	0.05504	0.00156	0.59863	0.01942	0.07889	0.00215	413.7	61.33	476.4	12.34	489.5	12.84	97%
17	287	238	1.21	0.05444	0.00209	0.58582	0.0241	0.07805	0.00218	389.2	83.19	468.2	15.43	484.5	13.05	97%
18	337	273	1.24	0.05422	0.00199	0.58934	0.02337	0.07884	0.00219	379.9	79.81	470.4	14.93	489.2	13.11	96%
19	389	796	0.49	0.05373	0.00151	0.44562	0.0144	0.06015	0.00164	359.8	62.19	374.2	10.12	376.5	9.95	99%
20	430	360	1.19	0.05477	0.0017	0.5461	0.01901	0.07232	0.00198	402.7	67.42	442.4	12.48	450.1	11.91	98%
21	789	2215	0.36	0.05474	0.00127	0.37757	0.01071	0.05003	0.00135	401.4	50.86	325.2	7.9	314.7	8.26	103%
22	839	492	1.71	0.05473	0.00169	0.55766	0.01932	0.0739	0.00202	401.3	66.99	450	12.59	459.6	12.14	98%
23	1983	836	2.37	0.05599	0.00143	0.61051	0.01847	0.07909	0.00214	451.5	55.78	483.9	11.65	490.7	12.78	99%
24	56	37	1.54	0.10438	0.0078	1.03019	0.07602	0.07158	0.0025	1703.4	131.57	719	38.02	445.7	15.05	161%
25	37	88	0.42	0.05467	0.00342	0.50397	0.03198	0.06686	0.00202	398.7	133.95	414.4	21.59	417.2	12.2	99%