

西天山那拉提地区古生代花岗岩的年代学和锆石 Hf 同位素研究

徐学义¹, 王洪亮¹, 马国林², 李平¹, 陈隽璐¹, 李婷³

(1. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 甘肃煤田地质局, 甘肃 兰州 730000;
3. 长安大学 资源学院, 陕西 西安 710063)

摘要: 西天山那拉提地区发育强烈的古生代花岗岩浆活动, 依据野外地质特征和形成时代, 将该区花岗岩分为早古生代—晚泥盆世花岗岩和石炭纪花岗岩两类。前者变形较强, 发育弱的片麻理构造, 岩石类型主体为闪长岩—石英闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩, LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年揭示其形成时代为 366~485 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $t_{2\text{DM}}$ 的研究揭示花岗岩主要有 3 种来源: 一是 $t_{2\text{DM}}$ 介于 1.2~1.6 Ga 的中元古代地壳源区; 二是 $t_{2\text{DM}}$ 介于 0.7~1.6 Ga 的中新元古代地壳混合源区; 三是 $t_{2\text{DM}}$ 与岩石形成年龄接近或略大的以亏损地幔新生地壳为主的地壳源区。后者变形很弱, LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年揭示其形成时代为 320~352 Ma。晚泥盆世—石炭纪花岗岩主要源区亦有 3 种: 一是 $t_{2\text{DM}}$ 介于 1.0~1.7 Ga 的中新元古代混合源区; 二是 $t_{2\text{DM}}$ 约为 0.4 Ga 左右的早古生代新生地壳源区; 三是早石炭世早期与岩浆形成年龄一致的亏损地幔和古老地壳混合源区。那拉提早石炭世花岗闪长岩当 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为最高的正值时 (14.21), 其 $t_{2\text{DM}}$ 与岩石形成年龄一致, 表明在 349 Ma 时存在一次地幔物质的加入。综合西天山地区区域地质演化和花岗岩的野外地质特征、时代格架、锆石 Hf 同位素揭示的源区特征, 认为那拉提地区现划分的古元古代地层中存在 0.7~0.8 Ga、1.6~1.8 Ga 中新元古代增生地壳。石炭纪花岗岩为碰撞后大陆伸展作用的产物, 早石炭世大规模地幔物质的加入代表了大陆伸展作用的强烈发育期。

关键词: 花岗岩成因, 锆石 Hf 同位素, LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年, 古生代, 西天山那拉提

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)06-0691-16

Geochronology and Hf isotope characteristics of the Paleozoic granite in Nalati area, West Tianshan Mountains

XU Xue-yi¹, WANG Hong-liang¹, MA Guo-Lin², LI Ping¹, CHEN Jun-lu¹ and LI Ting³

(1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, China; 2. Gansu Bureau of Coalfield Geology, Lanzhou 730000, China; 3. College of Mineral Resources, Chang'an University, Xi'an 710063, China)

Abstract: Paleozoic granitic magmatism is well developed in Nalati area of West Tianshan Mountains. Based on field work, petrographic studies and LA-ICPMS zircon dating, the authors divided granitic magmatism in Nalati area into two stages. The first stage is from Late-Ordovician to Late-Devonian, and the granitoids formed in this stage have experienced a strong deformation and developed gneissic schistosity and large exposed areas of diorite, quartz diorite, granodiorite and monzogranite intrusions. From west to east, they include Senmutasi intrusion, Haerwenke intrusion, Kekesuhe intrusion and Nalati intrusion. Granitoids of this kind in the study area were mainly formed between 485 Ma and 366 Ma and constitute the main body of the granitoids in Nalati. The second stage is Carboniferous and the granitoids formed in this stage are located in the north of the first stage granitoids

收稿日期: 2010-04-18; 修订日期: 2010-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872061), 国土资源大调查资助项目(1212010611804, 1212010610319)

作者简介: 徐学义(1966-), 男, 研究员, 研究方向: 岩石地球化学, E-mail: xuxueyi1030@163.com。

or intruded into the first stage granitoids, and their exposed area is usually small. They have only undergone a weak or no deformation. Along the NEE-trending Nalati tectonic belt, there exists the feature that the formation ages of the granitoids gradually become younger from west to east, and become younger from south to north across the Nalati tectonic belt. Zircon Hf isotope studies reveal that the granitoids formed between Late-Ordovician and Late-Devonian in this area have three kinds of sources. The first ($t_{2DM} = 1\ 200 \sim 1\ 600$ Ma) is Mesoproterozoic crust, the second ($t_{2DM} = 700 \sim 1\ 600$ Ma) is Meso- and Neo-Proterozoic crust, and the third (the values of t_{2DM} are similar to or a little older than the formation ages of the granitoids) is a juvenile crust. Carboniferous granitoids also have three kinds of sources. The first ($t_{2DM} = 1\ 000 \sim 1\ 700$ Ma) is a Meso and Neo-Proterozoic mixed source, the second ($t_{2DM} \approx 400$ Ma) is an Early Paleozoic juvenile crust, and the third is a mixed region of Early-Carboniferous depleted mantle and ancient crust. Zircon Hf isotope researches on granitoids suggest that there exists a Meso- and Neo-Proterozoic crustal growth event in Nalati area. The Paleoproterozoic basement considered by present researchers may include Neoproterozoic, Mesoproterozoic, Paleoproterozoic and Archean materials, and its internal structure is so complex that we should do much future work on it. Chronological framework and deformation characteristics of granitoids suggest that the Late Devonian period may represent the end of the Paleozoic ocean-continent transition in the Tianshan Mountains. Zircon Hf isotope studies suggest that there were two events of mantle material addition that took place in Early Silurian and Early Carboniferous respectively. The former was a period of the Tianshan Paleozoic ocean subduction, and during this time the granitoids were formed by partial melting of a juvenile crust with the addition of some mantle materials. The latter represented a crustal growth event in Early Carboniferous, which suggests an influx of some mantle materials in a strong continental extension stage after a collisional orogeny.

Key words : petrogenesis of granite ; zircon Hf isotope ; LA-ICPMS zircon U-Pb dating ; Paleozoic ; Nalati area in West Tianshan Mountains

西天山那拉提地区花岗岩体出露广泛,除元古宙产出的古老侵入体花岗片麻岩外,主要呈岩基产出,沿构造线呈北东东向展布,在最新区域地质图中该部分花岗岩形成时代被统一划归为晚古生代(王洪亮等,2008)。最新的野外地质调查显示该类花岗岩可分为变形较强和未变形两类,未发生变形的花岗岩包括闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、斜长花岗岩、碱长花岗岩、二云母花岗岩等岩石类型,其野外产状、矿物组合及结构构造与其北侧伊犁微地块内未变形的花岗岩类一致,亦与其南部南天山未变形的花岗岩类一致;另一类为变形较强的花岗质岩石,少数岩体发育透入性面理以及矿物拉伸线理,其侵入围岩主要为前寒武系及志留系,个别岩体被下石炭统阿克萨克组不整合覆盖。前人对中天山东段和南天山变形较强的花岗岩类进行了全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄或单颗粒锆石 (TIMS) 年龄的测定(赵振华等,2003;韩宝福等,2004;张遵忠等,2005;杨天南等,2006;朱增伍等,2006;孙桂华等,2006;吴昌志等,2006;张晓梅等,2006),测年研究结果显示花岗岩形成时代跨早古生

代和晚古生代,多形成于前泥盆纪。目前那拉提地区整体研究程度较低,基本未进行详细的花岗岩年代格架及成因研究。本文在前人工作的基础上,重点对那拉提地区变形和未变形花岗岩开展 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年,建立花岗岩的年代格架,同时对锆石的 Hf 同位素进行分析,为分析花岗岩的源区提供制约,进而对那拉提古老基底的性质和天山洋陆转化的时限进行探讨。

1 地质背景及岩体地质

研究区属那拉提微地块,位于西天山伊犁地块南缘,南以中天山南缘蛇绿构造混杂带为界,东以独库公路为界,总体呈北东东向展布,东西延伸超过 300 km。那拉提微地块主要由古元古界构成,以往称为那拉提群,最新的区域地质图件中将其厘定为木扎尔特群,主要岩性为斜长角闪岩、云母石英片岩、角闪斜长片麻岩、肠状混合片麻岩、眼球状片麻岩及花岗片麻岩等。胡霏琴等(2006)的研究表明,那拉提地区古元古界的原岩主体为一套基性-中酸

性火山岩, 夹有少量陆源碎屑岩, 花岗质片麻岩原岩为花岗类岩石及少量变质辉长岩等。该古元古界变质基底北部被早石炭世火山-沉积岩系不整合覆盖, 局部地段以断层接触; 东部被晚志留世火山沉积岩系不整合上覆。那拉提微地块南缘的中天山南缘断裂是天山地区一条重要构造带, 发育榴辉岩、蓝闪石片岩等高压-超高压岩石, 代表了中天山南缘古洋盆闭合后的缝合带(董云鹏等, 2005)。它既是一条重要的构造变形带, 又是一条重要的岩相古地理界线, 也是一条明显的变质作用和岩浆活动的界线(汤耀庆等, 1995)。综合最新同位素年代学资料和区域地质资料(夏林圻等, 2002b; Xia *et al.*, 2004; 董云鹏等, 2005)表明, 中天山南缘蛇绿岩形成的主体时代应为志留纪, 板片俯冲事件应发生于中志留世—早泥盆世, 碰撞作用发生于中晚泥盆世。

那拉提微地块内花岗质岩石广泛出露, 它们与围岩具有明显的侵入接触关系。由西向东主要为森木塔斯片麻状花岗闪长岩体、片麻状石英闪长岩体、科克苏河哈拉温克尔片麻状黑云二长花岗岩体、科克苏河东岸片麻状含斑黑云母花岗岩体、二长花岗岩体、那拉提片麻状二长花岗岩-花岗闪长岩体、那拉提北恰布河花岗闪长岩体、二长花岗岩体(图 1)。

森木塔斯岩体位于那拉提微地块中西段, 呈不规则岩株侵入于前寒武纪基底之中, 出露面积近 50 km²。岩体边部受挤压特征十分明显, 暗色矿物具一定的定向性, 局部发育较强的糜棱岩化。主要由弱片麻状花岗闪长岩组成, 具花岗结构, 主要组成矿物为斜长石、石英、钾长石和少量的角闪石和黑云母,

副矿物为锆石、磷灰石、榍石和磁铁矿。岩体北部可见石英闪长岩体侵入于片麻状花岗闪长岩中。该石英闪长岩呈弱变形, 略显片麻状构造, 具半自形粒状结构, 主要组成矿物为斜长石、角闪石、石英和少量钾长石、黑云母, 副矿物有磷灰石、榍石、锆石、磁铁矿、钛铁矿等。

哈拉温克尔岩体位于那拉提微地块中部, 呈不规则状侵入于前寒武纪基底之中, 出露面积约 40 km²。根据岩性特征及野外接触关系, 主要为片麻状黑云二长花岗岩体, 呈中细粒花岗结构, 弱片麻状构造。主要组成矿物为钾长石、斜长石、石英和少量的黑云母, 副矿物有磁铁矿、锆石。科克苏河东岸花岗岩体位于哈拉温克尔岩体东北部, 侵入于哈拉温克尔岩体之中, 主要由弱片麻状黑云母花岗岩组成。呈斑状结构, 块状构造, 斑晶为钾长石, 主要组成矿物为斜长石、钾长石、石英, 含少量的黑云母, 副矿物有磁铁矿、榍石、锆石。科克苏河东岸二长花岗岩体位于片麻状黑云母花岗岩的北部并侵入其中, 呈中粗粒花岗结构, 主要组成矿物为钾长石、斜长石、石英和少量黑云母, 副矿物有锆石、榍石、磷灰石、磁铁矿等。

那拉提岩体位于那拉提微地块中东部, 是那拉提地区最大的岩体, 面积约 2 000 km², 侵入于南部的中天山南缘构造带和北部的前寒武纪基底之中。岩体的南部主要是花岗质糜棱岩, 为中天山南缘构造带北缘的大型韧性剪切带, 糜棱岩化的强度由岩体边部往岩体的中心部位逐渐减弱。岩体主要岩石类型为二长花岗岩和花岗闪长岩, 其中花岗闪长岩形成略晚, 侵入于二长花岗岩中。二长花岗岩呈中

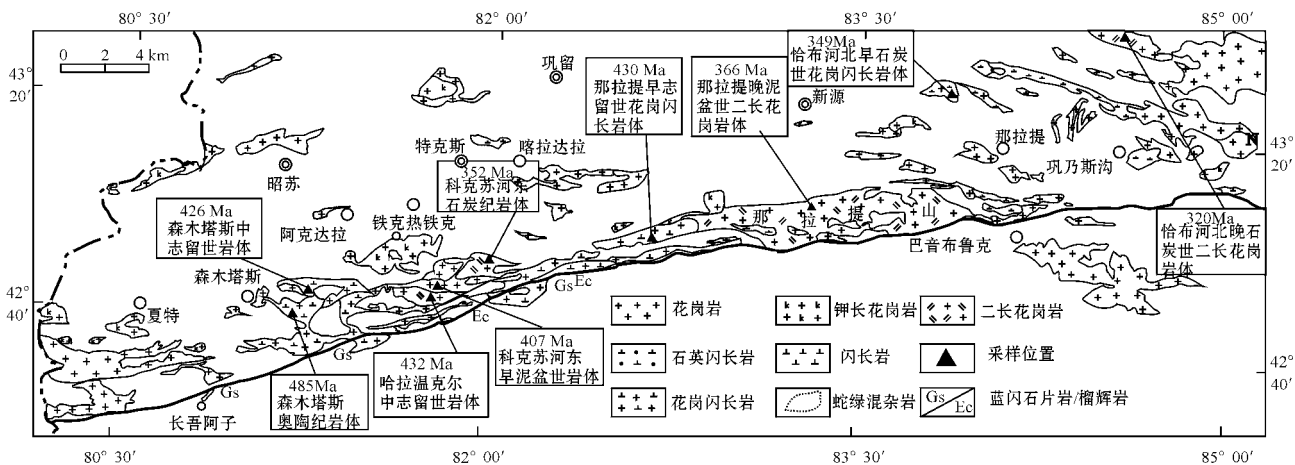


图 1 西天山那拉提地区花岗岩分布图

Fig. 1 Distribution of granites in Nalati area, West Tianshan Mountains

粗粒花岗岩结构,主要由钾长石、斜长石、石英和黑云母组成,副矿物为榍石、锆石和磁铁矿等。花岗闪长岩呈中细粒花岗岩结构,主要组成矿物为斜长石、石英、钾长石和少量的角闪石、黑云母,副矿物为锆石、磷灰石、榍石和磁铁矿。花岗闪长岩中可见有更晚期的花岗岩脉侵入。那拉提北恰布河花岗闪长岩体位于塔勒木吉尔浪河一支流交汇处,呈中细粒花岗岩结构,主要组成矿物为斜长石、石英、钾长石、角闪石和少量黑云母。恰布河北二长花岗岩体侵入于花岗闪长岩体中,呈中粗粒花岗岩结构,块状构造,主要组成矿物为钾长石、斜长石、石英和少量黑云母,副矿物为榍石、锆石、磷灰石、磁铁矿等。

2 分析方法

锆石的分选在陕西省区域地质调查研究院单矿物分选实验室完成,首先采用常规方法进行粉碎,并用淘选、电磁选进行分离,再在双目镜下挑选出晶形完好、无明显裂痕且包裹体少的锆石。将它们粘贴在环氧树脂表面,再对其进行抛光露出锆石表面,样品靶的制备和锆石阴极发光(CL)图像的采集在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石 U-Pb 年龄测定在 LA-ICPMS 仪器上进行,测定时采用 10 Hz 的激光频率、80 mJ 的激光强度和 30 μm 的激光束斑直径,并以 91500 作为外部标样,普通 Pb 校正采用 Anderson (2002) 的方法,其年龄采用 ISOPLOT 程序计算 (Ludwig, 2003)。详细的实验过程、U-Pb 年龄和元素含量计算见 Yuan (2004)。锆石 Lu-Hf 同位素测试亦在西北大学国家重点实验室完成,采用配有 193 nm 的激光的 Neptune 多接收电感耦合等离子体谱仪 (LA-MC-ICPMS) 进行分析,分析过程中采用 8 Hz 的激光频率、100 mJ 的激光强度和 63 μm 的激光束斑直径。实验中以 He 作为剥蚀物质的载气,采用 91500 作为外部标样,具体测试过程见徐平等 (2004)。

3 花岗岩形成时代及 Hf 同位素测定

在进行过 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年研究的基础上,笔者对那拉提微地块内森木塔斯片麻状花岗闪长岩体、片麻状石英闪长岩体、科克苏河哈拉温克尔片麻状黑云二长花岗岩体、科克苏河东岸片麻状含斑黑云母花岗岩体、二长花岗岩体、那拉提片麻状花岗闪长岩-二长花岗岩体、那拉提北恰布河片麻状花岗闪

长岩体、二长花岗岩体中的锆石进行了原位 Hf 同位素分析工作,分析结果列于表 1,部分结果标定在图 2 中。 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 和单阶段模式年龄 (t_{DM}) 两阶段模式年龄 ($t_{2\text{DM}}$) 用岩体的形成年龄回时计算。上述岩体的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年成果本文只作简要报道。

3.1 奥陶纪-晚泥盆世花岗岩

森木塔斯片麻状花岗闪长岩 (ZS1-1) 锆石多为无色透明,少量为暗褐色,均为柱状晶体,所有锆石均显示有岩浆结晶形成的振荡环带,为岩浆锆石 (图 2a)。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年揭示其形成年龄为 485 ± 15 Ma,为早奥陶世。对 24 颗岩浆成因锆石进行了原位 Hf 同位素分析,按其加权平均年龄 485 Ma 计算的锆石初始 Hf 同位素成分为 $\epsilon\text{Hf}(t) = -3.80 \sim 6.71$,变化范围较大。从表 1 可知,该花岗岩模式年龄变化范围为 826~1 225 Ma,两阶段模式年龄变化于 915~1 461 Ma。

森木塔斯片麻状石英闪长岩锆石多为短柱状,振荡性环带不发育,但部分锆石发育扇状分带或内部具有冷杉叶状结构,个别锆石发育较好的振荡环带,显示均为岩浆锆石 (图 2b)。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年显示其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中分布于谐和线上较小的区域内,加权平均年龄为 426.7 ± 9.4 Ma。对 31 颗锆石进行了原位 Hf 同位素分析。从表 1 和图 3 中可知,以 $t = 426$ Ma 计算的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 多为高的正值,变化于 $-5.69 \sim 13.47$,主体变化于 $6.59 \sim 13.47$ 之间,单阶段模式年龄主体位于 514~776 Ma,两阶段模式年龄主体为 529~875 Ma。当 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为最高的 13.47 时,对应的 t_{DM} 和 $t_{2\text{DM}}$ 分别为 507 Ma 和 529 Ma。 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为负值的只有两个测点,最大的负值为 -5.69 ,另一个为 -0.74 ,对应的 t_{DM} 分别为 1 259 Ma 和 1 064 Ma, $t_{2\text{DM}}$ 分别为 1 509 Ma 和 1 257 Ma。

科克苏河哈拉温克尔片麻状黑云二长花岗岩锆石为长柱状晶体,长宽比多为 2:1~3:1,振荡环带发育,为岩浆结晶锆石 (图 2c)。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年显示 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄较为均一,在谐和线集中于很小的区域内,加权平均年龄为 432 ± 11 Ma。对 35 颗锆石进行了原位 Hf 同位素分析,以 $t = 432$ Ma 计算的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 主体变化于 $-8.14 \sim 7.53$,变化范围较大,反映出岩浆源区来源复杂的特点,其 t_{DM} 和 $t_{2\text{DM}}$ 分别变化于 728~1 346 Ma 之间和 819~1 602 Ma 之间,而当 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为最高的 7.53 时, $t_{2\text{DM}}$ 为 819 Ma。对于第 29 和 30 测点,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄

表 1 那拉提花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素测试数据

Table 1 Hf isotopic data of zircon grains from granites in Nalati area, West Tianshan Mountains

样品号	表面年龄/Ma	t/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\epsilon Hf(t)$	t_{DM}/Ma	t_{2DM}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
ZS1-1(森木塔斯早奥陶世花岗岩)										
ZS1-1TW-001	483	485	0.040 552	0.001 680	0.282 445	0.000 025	-1.41	1 162	1 339	-0.95
ZS1-1TW-002	451	485	0.023 353	0.000 983	0.282 599	0.000 024	4.26	924	1 059	-0.97
ZS1-1TW-003	495	485	0.037 034	0.001 570	0.282 383	0.000 027	-3.57	1 247	1 446	-0.95
ZS1-1TW-004	497	485	0.030 820	0.001 291	0.282 464	0.000 025	-0.61	1 123	1 295	-0.96
ZS1-1TW-007	498	485	0.026 475	0.001 102	0.282 514	0.000 026	1.22	1 047	1 201	-0.97
ZS1-1TW-012	516	485	0.021 594	0.000 850	0.282 667	0.000 025	6.71	826	915	-0.97
ZS1-1TW-013	502	485	0.038 891	0.001 639	0.282 491	0.000 027	0.23	1 095	1 251	-0.95
ZS1-1TW-014	454	485	0.025 714	0.001 076	0.282 482	0.000 022	0.09	1 092	1 271	-0.97
ZS1-1TW-016	483	485	0.039 589	0.001 522	0.282 376	0.000 026	-3.80	1 255	1 461	-0.95
ZS1-1TW-020	499	485	0.035 042	0.001 447	0.282 545	0.000 022	2.20	1 013	1 151	-0.96
ZS1-1TW-021	469	485	0.021 628	0.000 879	0.282 575	0.000 021	3.45	955	1 096	-0.97
ZS1-1TW-022	490	485	0.031 131	0.001 296	0.282 538	0.000 026	2.00	1 019	1 163	-0.96
ZS1-1TW-023	480	485	0.032 076	0.001 329	0.282 462	0.000 023	-0.70	1 127	1 304	-0.96
ZS1-1TW-025	505	485	0.025 407	0.001 052	0.282 466	0.000 022	-0.47	1 113	1 285	-0.97
ZS1-1TW-027	504	485	0.031 222	0.001 222	0.282 504	0.000 024	0.82	1 065	1 220	-0.96
ZS1-1TW-029	493	485	0.024 664	0.001 037	0.282 571	0.000 023	3.26	965	1 099	-0.97
ZS1-1TW-030	487	485	0.028 356	0.001 177	0.282 508	0.000 017	0.98	1 058	1 216	-0.96
ZS1-1TW-031	503	485	0.025 080	0.001 041	0.282 434	0.000 027	-1.60	1 158	1 343	-0.97
ZS1-1TW-033	470	485	0.028 489	0.001 182	0.282 399	0.000 023	-2.88	1 212	1 418	-0.96
ZS1-1TW-035	482	485	0.016 194	0.000 707	0.282 608	0.000 031	4.67	905	1 029	-0.98
ZS1-1TW-036	460	485	0.023 491	0.000 984	0.282 600	0.000 020	4.30	923	1 055	-0.97
ZS1-1TW-038	476	485	0.030 167	0.001 266	0.282 503	0.000 027	0.77	1 067	1 230	-0.96
ZS2-3(森木塔斯中志留世石英闪长岩)										
ZS2-3TW-001	441	426	0.007 970	0.000 329	0.282 802	0.000 018	10.34	628	690	-0.99
ZS2-3TW-002	450	426	0.028 015	0.001 090	0.282 889	0.000 020	13.20	517	543	-0.97
ZS2-3TW-003	441	426	0.020 297	0.000 792	0.282 814	0.000 026	10.63	619	675	-0.98
ZS2-3TW-004	439	426	0.027 315	0.001 058	0.282 706	0.000 020	6.73	776	875	-0.97
ZS2-3TW-005	431	426	0.030 761	0.001 194	0.282 733	0.000 021	7.65	741	828	-0.96
ZS2-3TW-006	443	426	0.032 666	0.001 261	0.282 898	0.000 020	13.47	507	529	-0.96
ZS2-3TW-007	440	426	0.017 757	0.000 690	0.282 708	0.000 020	6.91	766	866	-0.98
ZS2-3TW-008	427	426	0.021 317	0.000 831	0.282 855	0.000 019	12.07	561	601	-0.97
ZS2-3TW-009	434	426	0.023 868	0.000 921	0.282 764	0.000 019	8.82	691	768	-0.97
ZS2-3TW-010	447	426	0.024 399	0.000 932	0.282 859	0.000 023	12.18	557	595	-0.97
ZS2-3TW-011	449	426	0.023 712	0.000 910	0.282 817	0.000 021	10.70	616	671	-0.97
ZS2-3TW-012	427	426	0.015 929	0.000 622	0.282 711	0.000 026	7.03	760	860	-0.98
ZS2-3TW-013	425	426	0.025 982	0.000 992	0.282 829	0.000 021	11.10	601	650	-0.97
ZS2-3TW-014	427	426	0.023 452	0.000 891	0.282 811	0.000 021	10.50	625	682	-0.97
ZS2-3TW-015	437	426	0.016 145	0.000 636	0.282 731	0.000 021	7.74	733	823	-0.98
ZS2-3TW-016	422	426	0.028 686	0.001 109	0.282 770	0.000 023	8.98	686	759	-0.97
ZS2-3TW-017	420	426	0.013 917	0.000 541	0.282 351	0.000 029	-5.69	1 259	1 509	-0.98
ZS2-3TW-018	443	426	0.025 456	0.000 965	0.282 839	0.000 018	11.47	586	632	-0.97
ZS2-3TW-019	424	426	0.025 647	0.000 983	0.282 735	0.000 021	7.78	734	821	-0.97
ZS2-3TW-020	434	426	0.028 372	0.001 101	0.282 870	0.000 024	12.52	544	577	-0.97
ZS2-3TW-021	402	426	0.024 415	0.000 918	0.282 752	0.000 021	8.40	708	789	-0.97
ZS2-3TW-022	424	426	0.013 358	0.000 527	0.282 743	0.000 023	8.19	714	800	-0.98
ZS2-3TW-023	409	426	0.017 603	0.000 695	0.282 745	0.000 025	8.22	714	799	-0.98
ZS2-3TW-024	412	426	0.023 826	0.000 905	0.282 759	0.000 020	8.65	698	776	-0.97
ZS2-3TW-025	424	426	0.015 680	0.000 623	0.282 756	0.000 023	8.62	697	778	-0.98
ZS2-3TW-026	416	426	0.016 957	0.000 673	0.282 699	0.000 020	6.59	778	882	-0.98
ZS2-3TW-027	413	426	0.026 510	0.001 007	0.282 739	0.000 022	7.91	728	814	-0.97
ZS2-3TW-028	424	426	0.014 123	0.000 567	0.282 650	0.000 022	4.89	844	969	-0.98
ZS2-3TW-029	392	426	0.011 308	0.000 458	0.282 490	0.000 027	-0.74	1 064	1 257	-0.99
ZS2-3TW-030	410	426	0.026 142	0.000 997	0.282 890	0.000 020	13.26	514	539	-0.97
ZS2-3TW-031	411	426	0.016 171	0.000 637	0.282 827	0.000 022	11.13	598	649	-0.98
KK1-1(科克苏河哈拉温克尔早志留世黑云二长花岗岩)										
KK1-1TW-001	446	432	0.035 431	0.001 467	0.282 481	0.000 020	-0.93	1 106	1 282	-0.96
KK1-1TW-002	416	432	0.032 286	0.001 340	0.282 567	0.000 018	1.51	980	1 133	-0.96
KK1-1TW-003	411	432	0.035 318	0.001 460	0.282 629	0.000 023	3.57	894	1 024	-0.96
KK1-1TW-004	459	432	0.025 103	0.001 037	0.282 414	0.000 018	-2.90	1 187	1 393	-0.97
KK1-1TW-005	426	432	0.029 655	0.001 230	0.282 494	0.000 021	-0.83	1 080	1 261	-0.96
KK1-1TW-006	444	432	0.035 075	0.001 433	0.282 497	0.000 026	-0.40	1 082	1 253	-0.96
KK1-1TW-007	435	432	0.025 805	0.001 086	0.282 399	0.000 020	-3.96	1 210	1 427	-0.97
KK1-1TW-008	407	432	0.042 518	0.001 744	0.282 681	0.000 024	5.25	827	935	-0.95

续表 1-1
Continued Table 1-1

样品号	表面年龄/Ma	t/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\epsilon Hf(t)$	t_{DM}/Ma	t_{2DM}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
KK1-1TW-009	457	432	0.038 835	0.001 624	0.282 576	0.000 024	2.62	974	1 110	-0.95
KK1-1TW-010	426	432	0.038 946	0.001 560	0.282 657	0.000 021	4.85	857	971	-0.95
KK1-1TW-011	423	432	0.023 945	0.001 000	0.282 475	0.000 023	-1.50	1 100	1 293	-0.97
KK1-1TW-012	440	432	0.031 566	0.001 285	0.282 414	0.000 029	-3.38	1 195	1 402	-0.96
KK1-1TW-012	440	432	0.032 301	0.001 305	0.282 681	0.000 029	6.07	817	920	-0.96
KK1-1TW-013	440	432	0.024 579	0.001 111	0.282 297	0.000 021	-8.15	1 354	1 619	-0.97
KK1-1TW-014	430	432	0.022 772	0.000 937	0.282 621	0.000 025	3.84	893	1 026	-0.97
KK1-1TW-015	430	432	0.022 148	0.000 907	0.282 738	0.000 019	7.53	728	819	-0.97
KK1-1TW-016	409	432	0.021 284	0.000 879	0.282 401	0.000 019	-3.01	1 200	1 410	-0.97
KK1-1TW-017	473	432	0.023 421	0.000 996	0.282 444	0.000 024	-1.80	1 144	1 338	-0.97
KK1-1TW-018	432	432	0.018 210	0.000 756	0.282 566	0.000 021	1.98	966	1 122	-0.98
KK1-1TW-019	432	432	0.029 463	0.001 268	0.282 516	0.000 021	-0.36	1 050	1 225	-0.96
KK1-1TW-020	412	432	0.029 147	0.001 228	0.282 580	0.000 021	2.11	958	1 107	-0.96
KK1-1TW-021	421	432	0.030 569	0.001 281	0.282 489	0.000 027	-0.04	1 089	1 258	-0.96
KK1-1TW-022	433	432	0.040 288	0.001 639	0.282 624	0.000 020	3.81	906	1 030	-0.95
KK1-1TW-023	433	432	0.035 309	0.001 473	0.282 312	0.000 019	-8.14	1 346	1 602	-0.96
KK1-1TW-024	388	432	0.031 603	0.001 284	0.282 595	0.000 020	3.37	939	1 071	-0.96
KK1-1TW-025	456	432	0.027 640	0.001 186	0.282 569	0.000 022	2.27	973	1 119	-0.96
KK1-1TW-026	446	432	0.017 865	0.000 750	0.282 579	0.000 018	3.29	948	1 087	-0.98
KK1-1TW-027	471	432	0.016 602	0.000 671	0.282 489	0.000 021	0.19	1 071	1 248	-0.98
KK1-1TW-028	474	432	0.036 356	0.001 566	0.282 675	0.000 020	6.14	831	930	-0.95
KK1-1TW-029	457	432	0.039 871	0.001 706	0.281 759	0.000 019	-26.94	2 136	2 580	-0.95
KK1-1TW-030	428	432	0.039 871	0.001 706	0.281 759	0.000 018	-27.33	2 136	2 585	-0.95
KK1-1TW-031	409	432	0.028 598	0.001 165	0.282 581	0.000 021	2.65	955	1 098	-0.96
KK1-1TW-032	444	432	0.035 190	0.001 492	0.282 523	0.000 019	0.82	1 046	1 203	-0.96
KK1-1TW-033	459	432	0.038 438	0.001 636	0.282 699	0.000 018	6.69	798	891	-0.95
KK1-1TW-034	444	432	0.039 657	0.001 707	0.282 531	0.000 020	0.64	1 041	1 197	-0.95
KK1-1TW-035	440	432	0.031 096	0.001 306	0.282 400	0.000 022	-3.19	1 187	1 392	-0.96
XXY1-(那拉提北恰布河早志留世花岗岩闪长岩)										
XY1-1TW-001	430	430	0.079 958	0.003 133	0.282 936	0.000 018	14.38	475	449	-0.91
XY1-1TW-002	443	430	0.047 736	0.001 924	0.282 868	0.000 033	12.32	559	588	-0.94
XY1-1TW-003	442	430	0.030 148	0.001 200	0.282 866	0.000 023	12.45	551	581	-0.96
XY1-1TW-004	424	430	0.013 134	0.000 444	0.282 537	0.000 023	1.02	998	1 172	-0.99
XY1-1TW-005	668	430	0.015018	0.000689	0.281781	0.000021	-25.80	2 049	2 456	-0.98
XY1-1TW-006	395	430	0.030 660	0.001 187	0.282 686	0.000 019	6.09	807	921	-0.96
XY1-1TW-007	412	430	0.048 842	0.001 825	0.282 746	0.000 030	8.03	734	816	-0.95
XY1-1TW-008	416	430	0.025 529	0.000 978	0.282 522	0.000 025	0.34	1 033	1 209	-0.97
XY1-1TW-009	424	430	0.026 664	0.001 043	0.282 713	0.000 023	7.08	765	862	-0.97
XY1-1TW-010	860	430	0.021 110	0.000 851	0.282 298	0.000 021	-7.55	1 343	1 482	-0.97
XY1-1TW-011	397	430	0.060 321	0.002 264	0.282 926	0.000 031	14.27	479	503	-0.93
XY1-1TW-012	455	430	0.032 060	0.001 279	0.282 669	0.000 026	5.46	833	937	-0.96
XY1-1TW-013	803	430	0.033 412	0.001 316	0.282 298	0.000 025	-7.68	1 359	1 511	-0.96
XY1-1TW-014	439	430	0.035 490	0.001 355	0.282 760	0.000 023	8.66	705	777	-0.96
XY1-1TW-015	911	430	0.025 557	0.001 047	0.282 510	0.000 025	-0.10	1 052	1 092	-0.97
XY1-1TW-016	433	430	0.022 906	0.000 984	0.282 446	0.000 024	-2.35	1 140	1 341	-0.97
XY1-1TW-017	412	430	0.043 689	0.001 723	0.282 577	0.000 026	2.08	975	1 121	-0.95
XY1-1TW-018	457	430	0.031 023	0.001 205	0.282 662	0.000 027	5.23	841	948	-0.96
XY1-1TW-019	427	430	0.026 007	0.001 035	0.282 524	0.000 024	0.40	1 032	1 203	-0.97
XY1-1TW-020	442	430	0.022 333	0.000 877	0.282 666	0.000 024	5.47	828	940	-0.97
XY1-1TW-021	443	430	0.038 317	0.001 293	0.282 721	0.000 022	7.29	759	846	-0.96
XY1-1TW-022	430	430	0.028 863	0.001 173	0.282 589	0.000 021	2.66	944	1 087	-0.96
XY1-1TW-023	473	430	0.017 768	0.000 684	0.282 545	0.000 024	1.24	993	1 146	-0.98
XY1-1TW-024	434	430	0.024 969	0.001 040	0.282 623	0.000 022	3.90	893	1 022	-0.97
XY1-1TW-025	432	430	0.040 600	0.001 624	0.282 847	0.000 023	11.66	585	625	-0.95
XY1-1TW-026	439	430	0.051 648	0.001 954	0.282 944	0.000 028	15.00	448	451	-0.94
XY1-1TW-027	435	430	0.033 203	0.001 294	0.282 627	0.000 023	3.97	893	1 007	-0.96
XY1-1TW-028	423	430	0.031 010	0.001 210	0.282 790	0.000 025	9.76	659	725	-0.96
XY1-1TW-029	444	430	0.027 397	0.001 109	0.282 511	0.000 025	-0.09	1 052	1 223	-0.97
XY1-1TW-030	507	430	0.023 659	0.000 956	0.282 631	0.000 019	4.21	879	986	-0.97
XY1-1TW-031	415	430	0.026 416	0.001 073	0.282 731	0.000 022	7.71	741	832	-0.97
XY1-1TW-032	456	430	0.031 984	0.001 208	0.282 666	0.000 019	6.08	807	904	-0.96

续表 1-2
Continued Table 1-2

样品号	表面年龄/Ma	t/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\epsilon Hf(t)$	t_{DM}/Ma	t_{2DM}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
XY1-1TW-033	433	430	0.023 888	0.000 958	0.282 705	0.000 020	6.82	775	873	-0.97
XY1-1TW-034	870	430	0.019 062	0.000 763	0.282 247	0.000 018	-9.33	1 410	1 568	-0.98
XY1-1TW-035	444	430	0.040 601	0.001 614	0.282 777	0.000 023	9.19	685	749	-0.95
KK3-1C (科克苏河东岸片麻状黑云母花岗岩)										
KK3-1TW-001	422	407	0.012 205	0.000 500	0.282 714	0.000 020	6.79	753	852	-0.98
KK3-1TW-002	399	407	0.014 300	0.000 586	0.282 729	0.000 015	7.29	733	833	-0.98
KK3-1TW-003	418	407	0.017 733	0.000 713	0.282 727	0.000 017	7.19	739	833	-0.98
KK3-1TW-004	430	407	0.014 733	0.000 590	0.282 777	0.000 019	8.99	666	737	-0.98
KK3-1TW-005	422	407	0.032 572	0.001 257	0.282 693	0.000 016	5.84	798	901	-0.96
KK3-1TW-006	412	407	0.022 472	0.000 880	0.282 605	0.000 016	2.83	914	1 058	-0.97
KK3-1TW-007	417	407	0.014 300	0.000 579	0.282 609	0.000 018	3.05	901	1 045	-0.98
KK3-1TW-008	389	407	0.017 487	0.000 707	0.282 681	0.000 017	5.56	803	925	-0.98
KK3-1TW-009	417	407	0.039 386	0.001 569	0.282 774	0.000 022	8.62	688	757	-0.95
KK3-1TW-010	420	407	0.038 978	0.001 536	0.282 592	0.000 019	2.19	948	1 089	-0.95
KK3-1TW-011	392	407	0.062 039	0.002 389	0.282 502	0.000 018	-1.23	1 102	1 270	-0.93
KK3-1TW-012	380	407	0.010 404	0.000 428	0.282 688	0.000 017	5.88	787	911	-0.99
KK3-1TW-013	431	407	0.010 040	0.000 419	0.282 484	0.000 022	-1.33	1 070	1 264	-0.99
KK3-1TW-014	412	407	0.012 850	0.000 527	0.282 732	0.000 016	7.42	728	823	-0.98
KK3-1TW-015	425	407	0.051 291	0.001 977	0.282 655	0.000 023	4.30	868	980	-0.94
KK3-1TW-016	402	407	0.014 894	0.000 609	0.282 683	0.000 018	5.66	798	916	-0.98
KK3-1TW-017	396	407	0.019 809	0.000 783	0.282 504	0.000 020	-0.72	1 053	1 244	-0.98
KK3-1TW-018	396	407	0.013 504	0.000 549	0.282 708	0.000 018	6.56	762	872	-0.98
KK3-1TW-019	400	407	0.021 926	0.000 885	0.282 657	0.000 017	4.66	841	967	-0.97
KK3-1TW-020	405	407	0.014 810	0.000 614	0.282 664	0.000 018	4.99	825	950	-0.98
KK3-1TW-021	467	407	0.014 005	0.000 591	0.282 084	0.000 024	-15.54	1 628	1 974	-0.98
KK4-1C (科克苏河东岸晚泥盆世二长花岗岩)										
KK4-1TW-001	458	352	0.023 085	0.001 032	0.282 618	0.000 021	2.06	899	1 054	-0.97
KK4-1TW-002	369	352	0.061 729	0.002 462	0.282 611	0.000 017	1.48	945	1 084	-0.93
KK4-1TW-003	385	352	0.035 139	0.001 493	0.282 256	0.000 024	-10.86	1 425	1 711	-0.96
KK4-1TW-004	381	352	0.012 994	0.000 580	0.282 556	0.000 025	-0.03	975	1 161	-0.98
KK4-1TW-005	367	352	0.078 374	0.003 290	0.282 827	0.000 031	8.93	642	702	-0.90
KK4-1TW-006	359	352	0.043 763	0.001 877	0.282 425	0.000 027	-4.97	1 198	1 412	-0.94
KK4-1TW-007	417	352	0.029 937	0.001 150	0.282 491	0.000 018	-2.46	1 081	1 285	-0.97
KK4-1TW-008	358	352	0.035 018	0.001 567	0.282 656	0.000 020	3.28	858	991	-0.95
KK4-1TW-009	356	352	0.037 925	0.001 577	0.282 631	0.000 023	2.39	894	1 037	-0.95
KK4-1TW-011	344	352	0.020 745	0.000 889	0.282 676	0.000 020	4.15	814	947	-0.97
KK4-1TW-012	334	352	0.035 913	0.001 534	0.282 533	0.000 019	-1.06	1 033	1 213	-0.95
KK4-1TW-013	340	352	0.047 428	0.001 961	0.282 686	0.000 024	4.25	823	942	-0.94
KK4-1TW-014	423	352	0.032 251	0.001 395	0.282 590	0.000 019	0.98	948	1 109	-0.96
KK4-1TW-015	497	352	0.027 619	0.001 116	0.282 480	0.000 019	-2.84	1 096	1 304	-0.97
KK4-1TW-016	356	352	0.028 247	0.001 302	0.282 564	0.000 020	0.09	982	1 155	-0.96
KK4-1TW-017	379	352	0.028 801	0.001 219	0.282 564	0.000 017	0.11	980	1 154	-0.96
KK4-1TW-018	378	352	0.054 190	0.002 363	0.282 537	0.000 028	-1.12	1 050	1 216	-0.93
KK4-1TW-019	353	352	0.030 521	0.001 334	0.282 610	0.000 020	1.71	918	1 072	-0.96
KK4-1TW-020	361	352	0.035 278	0.001 460	0.282 539	0.000 022	-0.84	1 022	1 202	-0.96
KK4-1TW-021	443	352	0.026 326	0.001 214	0.282 700	0.000 019	4.92	787	907	-0.96
KK4-1TW-022	355	352	0.031 012	0.001 307	0.282 578	0.000 022	0.58	963	1 129	-0.96
KK4-1TW-023	390	352	0.038 062	0.001 495	0.282 526	0.000 019	-1.30	1 042	1 226	-0.95
KK4-1TW-024	328	352	0.015 124	0.000 699	0.282 539	0.000 021	-0.66	1 002	1 193	-0.98
KK4-1TW-025	403	352	0.034 938	0.001 467	0.282 485	0.000 020	-2.75	1 099	1 299	-0.96
KK4-1TW-026	356	352	0.028 118	0.001 278	0.282 668	0.000 019	3.77	834	966	-0.96
KK4-1TW-027	347	352	0.028 271	0.001 196	0.282 603	0.000 019	1.49	924	1 083	-0.96
KK4-1TW-028	369	352	0.069 847	0.003 244	0.282 536	0.000 026	-1.36	1 078	1 228	-0.90
KK4-1TW-029	348	352	0.034 094	0.001 443	0.282 654	0.000 016	3.24	858	994	-0.96
KK4-1TW-030	349	352	0.027 561	0.001 154	0.282 569	0.000 016	0.30	971	1 144	-0.97
TL1-X (那拉提二长花岗岩)										
TL1-2TW-001	373	366	0.043 961	0.001 857	0.282 473	0.000 017	-2.99	1 129	1 321	-0.94

续表 1-3
Continued Table 1-3

样品号	表面年龄/Ma	t/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\epsilon_{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	t_{2DM}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
TL1-2TW-002	501	366	0.025 980	0.001 029	0.282 283	0.000 017	-9.51	1 370	1 616	-0.97
TL1-2TW-003	398	366	0.025 035	0.001 050	0.282 625	0.000 022	2.59	890	1 029	-0.97
TL1-2TW-004	383	366	0.028 992	0.001 180	0.282 417	0.000 024	-4.81	1 187	1 411	-0.96
TL1-2TW-005	433	366	0.025 499	0.001 077	0.282 600	0.000 018	1.69	926	1 065	-0.97
TL1-2TW-006	375	366	0.036 153	0.001 501	0.282 482	0.000 023	-2.58	1 105	1 300	-0.95
TL1-2TW-007	385	366	0.035 903	0.001 529	0.282 632	0.000 021	2.72	892	1 027	-0.95
TL1-2TW-008	396	366	0.037 118	0.001 505	0.281 922	0.000 022	-22.40	1 897	2 297	-0.95
TL1-2TW-009	352	366	0.017 652	0.000 727	0.282 359	0.000 023	-6.75	1 254	1 518	-0.98
TL1-2TW-010	354	366	0.026 520	0.001 103	0.282 362	0.000 027	-6.73	1 262	1 517	-0.97
TL1-2TW-011	337	366	0.036 354	0.001 436	0.282 280	0.000 028	-9.72	1 389	1 673	-0.96
TL1-2TW-012	359	366	0.081 437	0.003 206	0.282 339	0.000 025	-8.06	1 371	1 582	-0.90
TL1-2TW-013	696	366	0.045 764	0.001 633	0.282 164	0.000 020	-13.87	1 561	1 788	-0.95
TL1-2TW-014	418	366	0.015 687	0.000 621	0.282 583	0.000 023	1.20	939	1 094	-0.98
TL1-2TW-015	345	366	0.027 248	0.001 094	0.282 267	0.000 020	-10.09	1 395	1 690	-0.97
TL1-2TW-016	346	366	0.028 784	0.001 290	0.282 523	0.000 019	-1.08	1 041	1 231	-0.96
TL1-2TW-017	526	366	0.018 584	0.000 788	0.281 460	0.000 041	-38.58	2 493	3 066	-0.98
TL1-2TW-018	384	366	0.019 256	0.000 784	0.282 488	0.000 019	-2.20	1 076	1 277	-0.98
TL1-2TW-020	735	366	0.046 176	0.001 836	0.282 339	0.000 024	-7.73	1 320	1 469	-0.94
TL1-2TW-021	380	366	0.037 647	0.001 521	0.282 443	0.000 021	-3.97	1 161	1 369	-0.95
TL1-2TW-022	368	366	0.034 678	0.001 520	0.282 429	0.000 016	-4.46	1 181	1 397	-0.95
TL1-2TW-023	361	366	0.045 725	0.001 910	0.282 461	0.000 019	-3.43	1 148	1 346	-0.94
TL1-2TW-024	371	366	0.033 070	0.001 385	0.282 490	0.000 019	-2.27	1 090	1 285	-0.96
TL1-2TW-026	358	366	0.028 471	0.001 214	0.282 548	0.000 014	-0.18	1 003	1 182	-0.96
TL1-2TW-027	372	366	0.044 971	0.001 900	0.282 457	0.000 014	-3.57	1 153	1 351	-0.94
TL1-2TW-028	383	366	0.038 965	0.001 680	0.282 547	0.000 018	-0.33	1 017	1 183	-0.95
TL1-2TW-030	376	366	0.029 757	0.001 298	0.282 397	0.000 015	-5.54	1 219	1 450	-0.96
TL2-7 那拉提花岗岩闪长岩)										
TL2-7TW-001	346	349	0.021 894	0.000 868	0.282 698	0.000 024	4.85	783	909	-0.97
TL2-7TW-002	367	349	0.028 906	0.001 160	0.282 530	0.000 020	-1.16	1 027	1 211	-0.97
TL2-7TW-003	346	349	0.028 641	0.001 132	0.282 773	0.000 026	7.45	682	776	-0.97
TL2-7TW-004	347	349	0.054 769	0.002 100	0.282 799	0.000 022	8.14	662	740	-0.94
TL2-7TW-005	345	349	0.044 915	0.001 711	0.282 820	0.000 018	8.97	625	698	-0.95
TL2-7TW-006	343	349	0.040 622	0.001 540	0.282 429	0.000 026	-4.82	1 181	1 404	-0.95
TL2-7TW-007	340	349	0.040 993	0.001 549	0.282 660	0.000 020	3.35	852	988	-0.95
TL2-7TW-008	350	349	0.029 034	0.001 117	0.282 863	0.000 019	10.63	554	611	-0.97
TL2-7TW-009	340	349	0.048 649	0.001 869	0.282 969	0.000 028	4.21	351	349	-0.94
TL2-7TW-010	343	349	0.057 112	0.002 206	0.282 802	0.000 023	8.22	660	737	-0.93
TL2-7TW-011	346	349	0.026 065	0.001 010	0.282 800	0.000 021	8.43	642	726	-0.97
TL2-7TW-012	337	349	0.040 017	0.001 556	0.282 626	0.000 025	2.15	901	1 050	-0.95
TL2-7TW-013	355	349	0.032 336	0.001 250	0.282 861	0.000 024	10.53	559	615	-0.96
TL2-7TW-014	358	349	0.019 680	0.000 774	0.282 513	0.000 027	-1.67	1 040	1 240	-0.98
TL2-7TW-015	344	349	0.030 889	0.001 217	0.282 732	0.000 019	5.97	742	852	-0.96
TL2-7TW-016	349	349	0.025 903	0.000 999	0.282 430	0.000 024	-4.66	1 163	1 394	-0.97
TL2-7TW-017	346	349	0.035 691	0.001 379	0.282 588	0.000 025	0.84	951	1 115	-0.96
TL2-7TW-018	338	349	0.066 095	0.002 500	0.282 850	0.000 023	9.85	595	654	-0.92
TL2-7TW-019	370	349	0.024 194	0.000 973	0.282 751	0.000 024	6.70	711	808	-0.97
TL2-7TW-020	354	349	0.060 387	0.002 324	0.282 847	0.000 022	9.79	596	654	-0.93
TL2-7TW-021	336	349	0.043 606	0.001 667	0.282 606	0.000 021	1.41	932	1 088	-0.95
TL2-7TW-022	382	349	0.031 791	0.001 225	0.282 657	0.000 021	3.32	849	978	-0.96
TL2-7TW-023	351	349	0.045 092	0.001 763	0.282 689	0.000 018	4.33	815	935	-0.95
TL2-7TW-024	344	349	0.060 892	0.002 297	0.282 761	0.000 021	6.75	722	812	-0.93
TL2-7TW-025	350	349	0.039 364	0.001 494	0.282 800	0.000 023	8.32	650	730	-0.95
TL2-7TW-026	367	349	0.042 951	0.001 602	0.282 740	0.000 015	6.17	738	836	-0.95
TL2-7TW-027	347	349	0.028 205	0.001 076	0.282 690	0.000 017	4.52	799	926	-0.97
TL2-7TW-028	380	349	0.020 470	0.000 806	0.282 697	0.000 019	4.83	783	901	-0.98
TL2-7TW-029	369	349	0.049 188	0.001 914	0.282 882	0.000 023	11.12	538	581	-0.94
TL2-7TW-030	345	349	0.046 691	0.001 805	0.282 829	0.000 024	9.27	614	683	-0.95
TL2-7TW-031	364	349	0.058 291	0.002 246	0.282 925	0.000 018	12.57	480	508	-0.93

续表 1-4
Continued Table 1-4

样品号	表面年龄/Ma	t/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\epsilon Hf(t)$	t_{DM}/Ma	t_{2DM}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
XY2-1(那拉提恰布河北二长花岗岩)										
XY2-1TW-001	316	320	0.073 250	0.002 829	0.282 974	0.000 030	13.60	414	434	-0.91
XY2-1TW-003	309	320	0.108 754	0.004 139	0.282 914	0.000 023	11.19	522	558	-0.88
XY2-1TW-004	322	320	0.065 821	0.002 502	0.282 931	0.000 022	12.14	474	509	-0.92
XY2-1TW-005	313	320	0.036 894	0.001 541	0.282 974	0.000 023	13.87	399	420	-0.95
XY2-1TW-006	315	320	0.082 673	0.003 185	0.282 967	0.000 025	13.27	428	451	-0.90
XY2-1TW-007	315	320	0.101 742	0.003 760	0.282 928	0.000 020	11.77	495	529	-0.89
XY2-1TW-008	318	320	0.111 650	0.004 258	0.282 979	0.000 025	13.47	423	441	-0.87
XY2-1TW-009	311	320	0.163 815	0.006 088	0.282 923	0.000 029	11.10	539	563	-0.82
XY2-1TW-010	319	320	0.112 836	0.004 244	0.282 998	0.000 024	14.14	393	406	-0.87
XY2-1TW-011	331	320	0.117 137	0.004 451	0.282 991	0.000 027	13.85	407	421	-0.87
XY2-1TW-012	323	320	0.082 370	0.003 169	0.282 940	0.000 027	12.32	469	500	-0.90
XY2-1TW-013	303	320	0.107 459	0.004 060	0.282 991	0.000 025	13.94	402	417	-0.88
XY2-1TW-014	315	320	0.104 171	0.003 860	0.282 900	0.000 024	10.76	540	581	-0.88
XY2-1TW-015	322	320	0.080 571	0.003 051	0.282 952	0.000 023	12.77	449	477	-0.91
XY2-1TW-016	321	320	0.154 090	0.005 733	0.282 883	0.000 030	9.76	598	632	-0.83
XY2-1TW-017	308	320	0.065 537	0.002 454	0.282 965	0.000 026	13.36	423	447	-0.93
XY2-1TW-018	312	320	0.126 586	0.004 766	0.282 821	0.000 024	7.77	679	734	-0.86
XY2-1TW-019	319	320	0.113 491	0.004 252	0.282 981	0.000 023	13.54	420	437	-0.87
XY2-1TW-021	458	320	0.014 336	0.000 589	0.282 708	0.000 020	4.66	762	894	-0.98
XY2-1TW-022	325	320	0.105 797	0.003 913	0.282 922	0.000 024	11.53	507	541	-0.88
XY2-1TW-023	352	320	0.085 930	0.003 278	0.282 921	0.000 028	11.63	499	536	-0.90
XY2-1TW-025	329	320	0.062 610	0.002 404	0.282 928	0.000 021	12.06	477	514	-0.93
XY2-1TW-028	336	320	0.094 994	0.003 602	0.282 986	0.000 025	13.86	405	421	-0.89
XY2-1TW-030	328	320	0.077 680	0.002 939	0.282 950	0.000 021	12.72	451	479	-0.91
XY2-1TW-031	327	320	0.096 731	0.003 666	0.282 945	0.000 021	12.39	468	497	-0.89

表中锆石 Hf 同位素成分计算所用的参数: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.865 \times 10^{-11}$ 球粒陨石 $^{176}Lu/^{177}Hf = 0.033 2$, $^{176}Hf/^{177}Hf = 0.282 772$ (Blichert and Alberade, 1997), 亏损地幔 $^{176}Lu/^{177}Hf = 0.038 4$, $^{176}Hf/^{177}Hf = 0.283 25$ (Griffin *et al.*, 2002), 硅铝质地壳的 $f_{Lu/Hf}$ 为 0.72 (Vervoort *et al.*, 1996)。

测试结果与岩浆形成年龄一致,但经回时计算的 $\epsilon Hf(t)$ 为 $-26.94 \sim -27.33$, 对应的 t_{DM} 为 $2 136 Ma$, t_{2DM} 为 $2 580 \sim 2 585 Ma$ 。

科克苏河东岸片麻状黑云母花岗岩中锆石多呈短柱状晶体,长宽比多为 $2:1$,振荡性环带和扇形分带发育,其中一个颗粒发育继承核和岩浆生长边(图 2d)。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年显示岩浆锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄较为均一,在谐和线集中于很小的区域内,加权平均年龄为 $407 \pm 12 Ma$ 。对 21 颗锆石进行了原位 Hf 同位素分析,以 $t = 407 Ma$ 计算的 $\epsilon Hf(t)$ 值,其中 20 颗岩浆锆石主体变化于 $-1.33 \sim 8.99$,大多数为较高的正值。其中 $\epsilon Hf(t)$ 为较高正值($4 \sim 8$)之间的锆石,其 t_{DM} 介于 $666 \sim 841 Ma$, t_{2DM} 介于 $737 \sim 967 Ma$ 之间。 $\epsilon Hf(t)$ 值为较低正值和负值,变化于 $-1.33 \sim 3.05$ 之间, t_{DM} 介于 $901 \sim 1 070 Ma$ 之间, t_{2DM} 介于 $1 045 \sim 1 264 Ma$ 之间。对于其中 3 个 $\epsilon Hf(t)$ 为负值的锆石,主体 t_{2DM} 位于 $1 244 \sim 1 270 Ma$ 之间。对于 21 号锆石样品,其 $\epsilon Hf(t)$ 值为最

大的负值(-15.54), t_{2DM} 为 $1 974 Ma$ 。

那拉提二长花岗岩西部的片麻状花岗闪长岩锆石均呈柱状晶体,发育有继承核和岩浆生长环边,或为具振荡环带具有岩浆成因特点的锆石(图 2e)。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年显示继承核的 $^{206}Pb/^{238}U$ 的表面年龄介于 $507 \sim 911 Ma$ 之间,岩浆成因特点锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄介于 $395 \sim 443 Ma$ 之间,加权平均年龄为 $430 \pm 7 Ma$ 。以 $t = 430 Ma$ 对岩浆锆石进行 Hf 同位素回时计算,其 $\epsilon Hf(t)$ 值变化于 $-2.35 \sim 15.00$ 之间,主体为较高的正值, t_{DM} 变化于 $448 \sim 1 140 Ma$ 之间, t_{2DM} 变化于 $451 \sim 1 341 Ma$ 之间。岩浆锆石中两个 $\epsilon Hf(t)$ 最大的正值是 14.27 和 15.00 , 对应的 t_{DM} 为 $448 \sim 479 Ma$, t_{2DM} 为 $451 \sim 503 Ma$, 接近于岩浆锆石形成年龄。对于继承锆石,表面年龄为 $507 Ma$ 的锆石样品 $\epsilon Hf(t)$ 值为 4.21 , 对应的 t_{DM} 和 t_{2DM} 值分别为 $879 Ma$ 和 $986 Ma$, 表面年龄为 $668 Ma$ 的锆石,具有最小的 $\epsilon Hf(t)$ 值,为高的负值(-25.80), 对应 t_{DM} 和 t_{2DM} 分别为 $2 049 Ma$

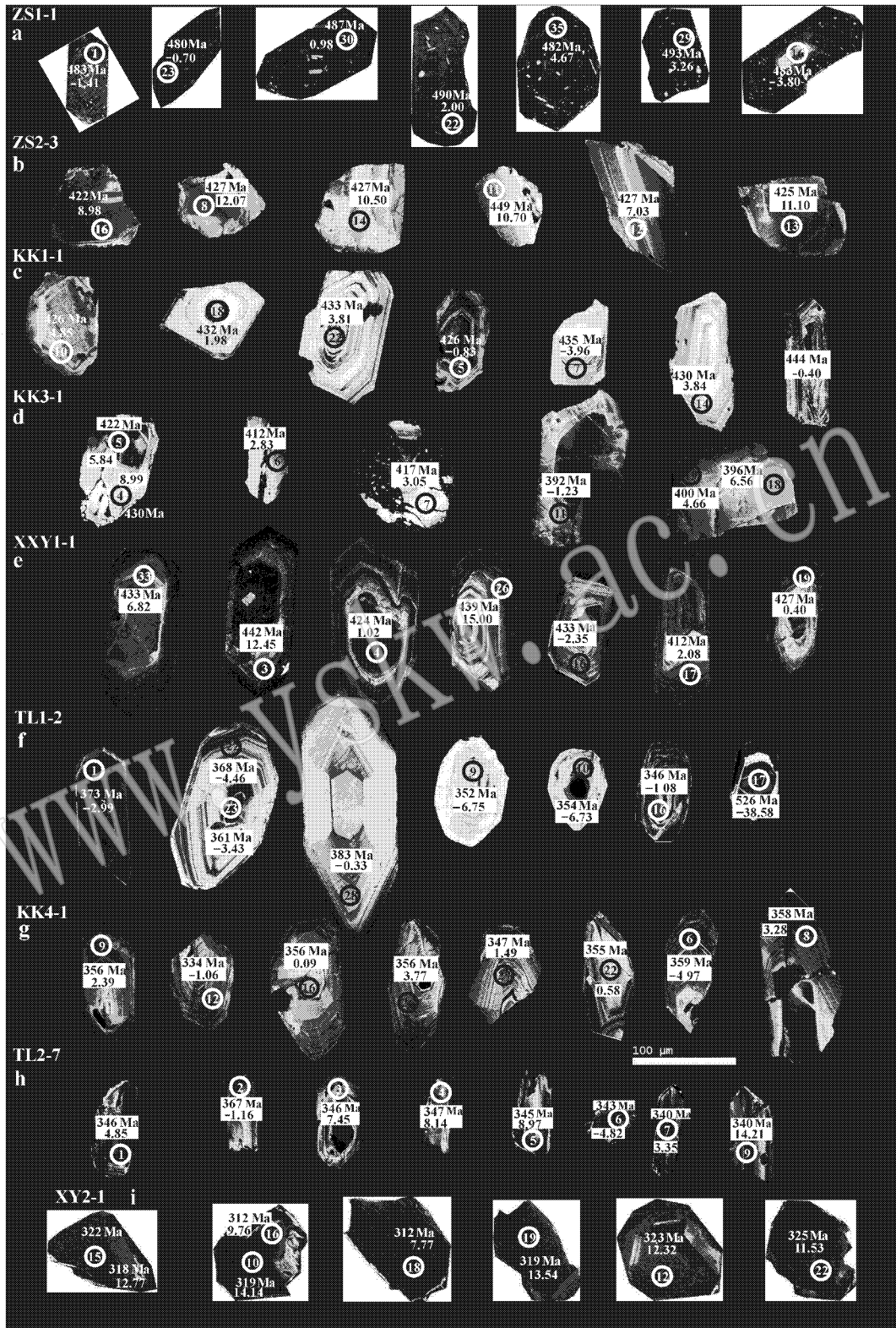


图 2 西天山那拉提花岗岩锆石典型 CL 图像

Fig. 2 Representative CL images of zircon from granites in Nalati area
 图中标识出锆石表面年龄和按形成年龄时计算的 Hf 同位素初始值
 Zircon dating data and initial Hf isotopic values are also noted in the figure

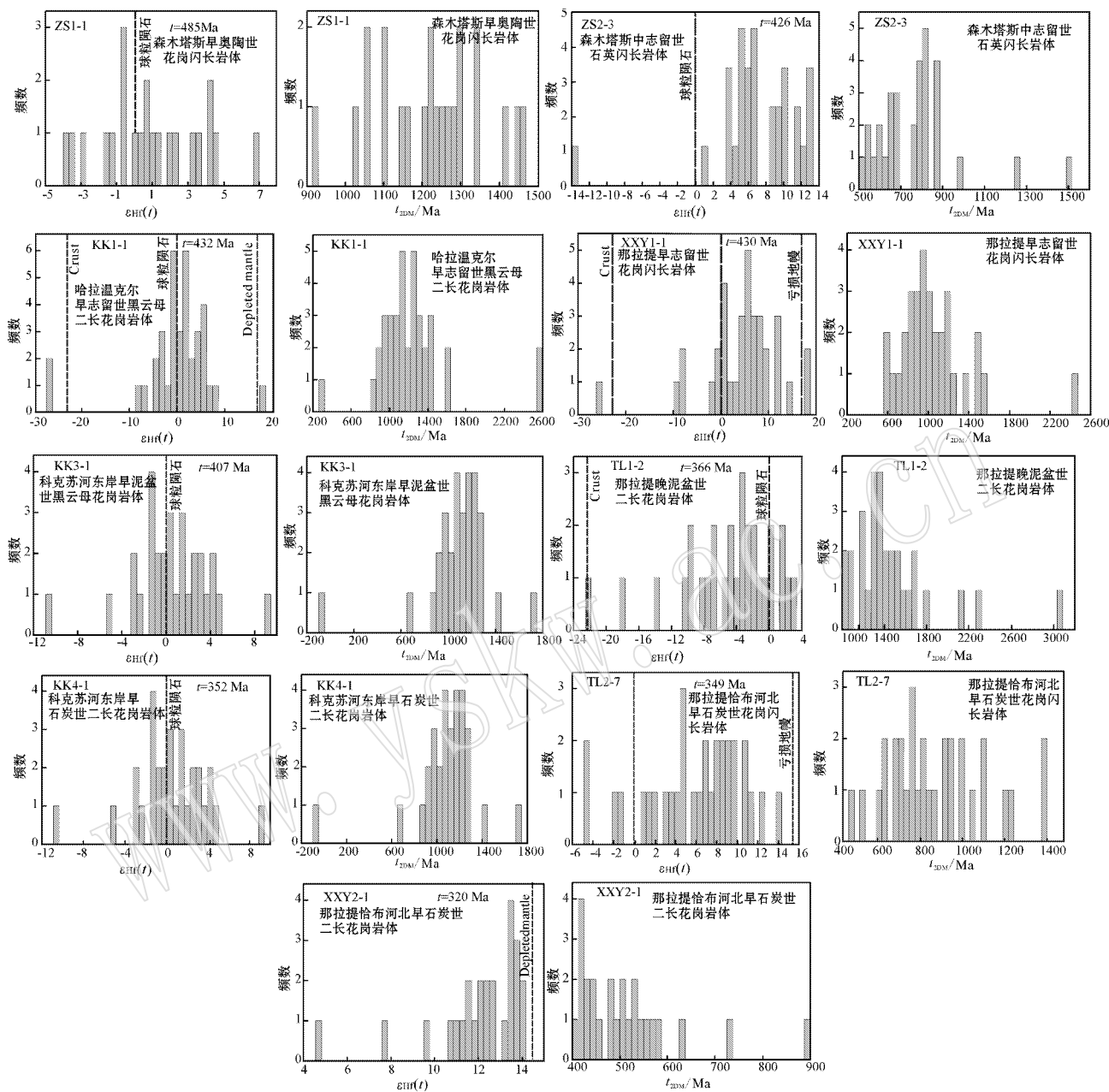


图 3 西天山那拉提古生代花岗岩锆石 Hf 同位素组成

Fig. 3 Zircon Hf isotopic data of Paleozoic granites in Nalati area, West Tianshan Mountains

和 2456 Ma。表面年龄为 911 Ma 的锆石,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -0.10 , 对应 t_{DM} 和 $t_{2\text{DM}}$ 分别为 1052 Ma 和 1092 Ma。表面年龄为 803、860 和 870 Ma 的锆石,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值比较均一,介于 $-7.55 \sim -9.33$ 之间, t_{DM} 为 1343~1410 Ma, $t_{2\text{DM}}$ 为 1482~1568 Ma。

那拉提二长花岗岩中锆石晶体为长柱状或短柱状晶体,发育有继承核和岩浆生长环边,后者具有岩浆成因的特点(图 2f)。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年结果显示继承核的时代不一, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变

化于 433~735 Ma。对于锆石的岩浆生长环边其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 337~398 Ma,加权平均年龄为 366 ± 11 Ma (MSWD = 0.43),该年龄代表了花岗岩的形成年龄。对 30 颗锆石进行了原位 Hf 同位素分析。对于岩浆成因锆石,以 $t = 366$ Ma 对 Hf 同位素进行回时计算, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主要变化于 $2.72 \sim -10.09$, 变化范围较大,其对应的 t_{DM} 变化于 892~1395 Ma, $t_{2\text{DM}}$ 变化于 1027~1690 Ma。对于一个表面年龄为 396 Ma 的锆石,它具有回时计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

最高的负值,为 -22.40 ,对应的 t_{DM} 和 t_{2DM} 分别为 $1\ 897\ Ma$ 和 $2\ 297\ Ma$ 。对于锆石继承核,同样按 $t = 366\ Ma$ 进行回时计算,其 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值主要为较大的负值,且变化较大,最小为 -38.58 ,最大为 1.69 。其中表面年龄为 $526\ Ma$ 的继承核,其 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 -38.58 , t_{2DM} 和 t_{DM} 分别为 $2\ 493\ Ma$ 和 $3\ 066\ Ma$ 。表面年龄为 $433\ Ma$ 的继承核,其 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 1.69 , t_{DM} 和 t_{2DM} 分别为 $926\ Ma$ 和 $1\ 065\ Ma$ 。其他表面年龄介于 $501 \sim 735\ Ma$ 的继承核, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 $-7.73 \sim -13.87$, t_{DM} 和 t_{2DM} 分别变化于 $1\ 370 \sim 1\ 561\ Ma$ 和 $1\ 616 \sim 1\ 788\ Ma$ 。

3.2 石炭纪花岗岩

科克苏河东岸二长花岗岩锆石为长柱状或短柱状,部分发育继承核和岩浆生长环边,部分为振荡环带完好的岩浆锆石(图2g)。LA-ICPMS锆石U-Pb测年结果显示,具有岩浆生长环带锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄可分为两组:一组表面年龄介于 $328 \sim 369\ Ma$,加权平均年龄为 $352.4 \pm 9\ Ma$ (MSWD=0.44),代表了花岗岩的形成年龄;另一组表面年龄介于 $381 \sim 497\ Ma$,代表了捕获的早期岩浆锆石。对30颗锆石进行了原位Hf同位素分析。从表1和图3中可知,对与岩体形成年龄一致的锆石,以 $t = 352\ Ma$ 计算的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 主体变化范围为 $-1.36 \sim 8.93$, t_{DM} 和 t_{2DM} 分别变化于 $642 \sim 1\ 078\ Ma$ 和 $702 \sim 1\ 228\ Ma$ 。捕获早期岩浆锆石Hf同位素同样以 $t = 352\ Ma$ 进行回时计算,其 $\epsilon_{Hf}(t)$ 变化范围介于 $-10.86 \sim 2.06$ 之间,整体低于寄主岩浆锆石, t_{DM} 和 t_{2DM} 分别变化于 $899 \sim 1\ 425\ Ma$ 和 $1\ 054 \sim 1\ 711\ Ma$ 。

那拉提恰布河北花岗闪长岩锆石均呈长柱状,发育振荡性环带或内部结构均一,具有岩浆成因锆石的特点(图2h)。LA-ICPMS锆石U-Pb定年结果显示所有锆石颗粒 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄比较集中,位于U-Pb谐和线上一个很小的区域内,加权平均年龄为 $349 \pm 7\ Ma$ (MSWD=0.27),代表了该花岗岩的形成年龄。对31颗锆石进行了原位Hf同位素分析,以 $t = 349\ Ma$ 对所有Hf同位素进行回时计算。结果表明,其 $\epsilon_{Hf}(t)$ 主体变化于 $-1.67 \sim 14.21$ 之间,主要为较高的正值,其 t_{DM} 和 t_{2DM} 分别变化于 $1\ 040 \sim 351\ Ma$ 和 $1\ 240 \sim 349\ Ma$ 之间。值得注意的是当 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为最高的正值时(14.21),其 t_{DM} 和 t_{2DM} 与岩石形成年龄一致。有两个颗粒为较高的负值(-4.66 和 -4.82),其 t_{DM} 和 t_{2DM} 分别为 $1\ 163$ 、

$1\ 181\ Ma$ 和 $1\ 394$ 、 $1\ 404\ Ma$ 。

那拉提恰布河北二长花岗岩锆石呈柱状晶体,一般振荡性环带不发育,内部结构及阴极发光强度均一,只有一颗锆石发育有核边结构,核发育有较好的环带结构,边部为均一结构(图2i)。LA-ICPMS锆石U-Pb定年显示继承核锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄为 $458\ Ma$,其他锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄较为集中,变化于 $303 \sim 336\ Ma$,加权平均年龄为 $320.7 \pm 7\ Ma$,该年龄应该代表了花岗岩的形成年龄。对25颗锆石进行了原位Hf同位素分析,对本次岩浆作用形成的锆石以 $t = 320\ Ma$ 进行Hf同位素回时计算,其 $\epsilon_{Hf}(t)$ 均为较大的正值,变化于 $7.77 \sim 14.14$,绝大多数均大于10,对应的 t_{DM} 变化于 $393 \sim 679\ Ma$, t_{2DM} 变化于 $406 \sim 734\ Ma$ 。对于唯一的继承锆石,以 $t = 320\ Ma$ 计算的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 4.66 ,相应的 t_{DM} 和 t_{2DM} 分别为 $762\ Ma$ 和 $894\ Ma$ 。

4 讨论

4.1 花岗岩类形成时代和分布

本次研究所测的花岗岩锆石LA-ICPMS U-Pb年龄精度较高,岩浆锆石给出的年龄结果可信度高,结合岩体野外地质的调查成果,可将那拉提花岗岩浆活动可分为两个阶段。第一阶段为晚奥陶世至晚泥盆世,该类花岗岩的形成时代介于 $485 \sim 366\ Ma$,构成那拉提地区花岗岩的主体,分布面积多在几十平方千米以上。由西往东包括森木塔斯岩体、哈拉温克尔岩体、科克苏河东岸岩体及那拉提岩体。该阶段岩体主要特征是变形较强,发育弱的片麻理构造;第二阶段为石炭纪,岩体形成年龄介于 $352 \sim 320\ Ma$,出露面积一般较小,多分布于第一阶段岩体的北部,或侵入于第一阶段花岗岩中,一般变形很弱或无变形。总体上讲,沿着北东东向展布的那拉提构造带,花岗岩的形成时代由西往东,整体显示出逐渐变新的特点,沿着垂直那拉提构造带的方向,由南往北,花岗岩形成时代逐渐变新(图1)。

4.2 岩浆源区性质示踪

近年来,锆石原位Hf同位素示踪研究越来越受到人们的重视(Vervoort *et al.*, 1996; Amelin *et al.*, 2000; Scherer *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2002; 吴福元等, 2007)。锆石是一种非常稳定的矿物,具有封闭温度高、相对于其他矿物较稳定的特点,而且锆石中具有较高的Hf含量,Lu的含量极

低,从而导致其 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 具有非常低的比值,由Lu衰变而成的 ^{176}Hf 很少,因此锆石在形成以后基本没有明显的放射性成因Hf的积累,且很少受到后期岩浆热事件的影响,即使在麻粒岩相等高级变质条件下,所测样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 基本可以代表其形成时体系的Hf同位素组成,这就使锆石可以记录岩浆源区不同性质的源岩特征,特别是通过与锆石U-Pb定年相结合,更使锆石原位Hf同位素分析成为揭示地壳演化和示踪岩浆源区的重要手段(Scherer *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2002)。一般来讲,岩浆锆石代表了岩浆Hf同位素组成,变质增生锆石代表了变质环境的Hf同位素组成,碎屑锆石则代表沉积岩源区物质形成时的Hf同位素组成。

基于岩浆锆石的初始Hf同位素组成,对那拉提微地块古生代花岗岩岩浆源区讨论如下:

4.2.1 奥陶纪-晚泥盆世花岗岩

森木塔斯早奥陶世花岗闪长岩 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 变化于 $-3.57\sim 6.71$,有一定的分散,22个数据约有14个为正值,8个为负值(图3)。485 Ma亏损地幔的理论值为15.24,与回时计算的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值相差很大,表明花岗岩不可能是由亏损地幔形成的新生地壳直接部分熔融的产物。花岗岩两阶段模式年龄变化范围为915~1461 Ma,主体变化于1200~1400 Ma,变化范围较小,其平均 $t_{2\text{DM}}$ 为1197 Ma,反映出该花岗岩最有可能是由形成时代为1200~1400 Ma的中元古代地壳部分熔融的产物。

森木塔斯中志留世石英闪长岩 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 $-5.69\sim 13.47$,部分大于10,最大为13.47(图3),接近426 Ma年时亏损地幔的理论值15.44,反映出由亏损地幔形成的新生地壳部分熔融在花岗岩形成中起主要作用。花岗岩的 $t_{2\text{DM}}$ 主要变化于529~875 Ma,远大于花岗岩的形成年龄,因此,花岗岩形成过程中存在地壳物质的混染。 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 最大的负值为 -5.69 ,对应的 $t_{2\text{DM}}$ 为1509 Ma,反映了混染地壳的形成时代最小为15亿年。

科克苏河哈拉温克尔早志留世黑云二长花岗岩 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 主体变化于 $-8.15\sim 7.53$, $t_{2\text{DM}}$ 变化于819~1619 Ma之间(图3),反映中新元古代地壳是花岗岩的主要源区。由 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 -26.94 和 -27.33 两个测点可知,其对应的 $t_{2\text{DM}}$ 为2580~2585 Ma,表明古元古代古老地壳参与了花岗岩的形成。

科克苏河东岸早泥盆世片麻状黑云母花岗岩岩浆锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 主体为正值,变化于 $-1.33\sim 8.99$ 之

间,其 $t_{2\text{DM}}$ 为737~1264 Ma(图3),反映中新元古代地壳为花岗岩的主要源区。对形成年龄为467 Ma的捕获岩浆锆石,其 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 -15.54 , $t_{2\text{DM}}$ 为1974 Ma,反映其主要来源于元古宙古老地壳源区。

那拉提北恰布河早志留世花岗闪长岩 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变化于 $-2.35\sim 15.00$ 之间,主体为较高的正值, $t_{2\text{DM}}$ 变化于451~1341 Ma之间。岩浆锆石中两个 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 最大的正值是14.38和15.00(接近于亏损地幔在花岗岩形成时的理论值15.43),对应 $t_{2\text{DM}}$ 为449~451 Ma,略大于岩浆锆石形成年龄,反映早志留世亏损地幔新生地壳部分熔融在花岗岩形成中起到主要作用。当 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 -2.35 时, $t_{2\text{DM}}$ 为1341 Ma,说明混染的古老地壳的最小形成时代约是13亿年。表面年龄为507 Ma的继承锆石样品 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为4.21,对应的 $t_{2\text{DM}}$ 为986 Ma,新元古代地壳可能为其主要源区;表面年龄为668 Ma的继承锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 -25.80 ,对应 $t_{2\text{DM}}$ 为2456 Ma,锆石主要源区为古老地壳。表面年龄为911 Ma的锆石,其 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 -0.10 ,对应 $t_{2\text{DM}}$ 为1092 Ma,新元古代地壳可能为其源区;表面年龄为803 Ma,860 Ma和870 Ma的锆石,其 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值比较均一,介于 $-7.55\sim -9.33$ 之间, $t_{2\text{DM}}$ 为1482~1568 Ma,为中元古代地壳部分熔融的产物。

科克苏河东岸晚泥盆世二长花岗岩 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 变化于 $-1.36\sim 8.93$, $t_{2\text{DM}}$ 变化于702~1228 Ma,同样显示中新元古代地壳为花岗岩的主要源区。捕获早期岩浆锆 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 变化范围介于 $-10.86\sim 2.06$ 之间,以负值居多,反映地壳源区贡献占主导,由于 $t_{2\text{DM}}$ 变化于1054~1711 Ma,因此地壳源区主要为中新元古代地壳。

那拉提二长花岗岩 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 主要变化于 $2.72\sim -10.09$,以负值为主, $t_{2\text{DM}}$ 变化于1027~1690 Ma,说明花岗岩的源区以中新元古代地壳为主。表面年龄为396 Ma的锆石, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 -22.40 ,对应的 $t_{2\text{DM}}$ 为2297 Ma,说明锆石形成时古元古地壳为其主要源区。表面年龄为526 Ma继承核, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 -38.58 , $t_{2\text{DM}}$ 为3066 Ma,古老地壳为其源区。表面年龄为433 Ma的继承核,其 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为1.69, $t_{2\text{DM}}$ 为1065 Ma,新元古代地壳是其主要源区。其他表面年龄介于501~735 Ma的继承核, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 $-7.73\sim -13.87$, $t_{2\text{DM}}$ 为1616~1788 Ma,均表明中元古代地壳为其源区。

前述研究表明,奥陶-晚泥盆世花岗岩都存在正

和负的初始 ϵ_{Hf} 值,绝大多数以正值为主。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $t_{2\text{DM}}$ 的研究揭示花岗岩主要有3种来源:一是 $t_{2\text{DM}}$ 介于12~16亿年的中元古代地壳源区;二是 $t_{2\text{DM}}$ 介于7~16亿年的中新元古代地壳混合源区;三是 $t_{2\text{DM}}$ 与岩石形成年龄接近或略大的亏损地幔新生地壳为主的地壳源区。而捕获锆石同样显示出3种地壳源区,分别是 $t_{2\text{DM}}$ 为19~25亿年的古元古代地壳源区、 $t_{2\text{DM}}$ 为14~15亿年的中元古代地壳源区和 $t_{2\text{DM}}$ 约为10亿年的新元古代地壳源区。

4.2.2 石炭纪花岗岩

那拉提恰布河北花岗岩闪长岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主体变化于-1.67~14.21之间,主要为较高的正值, $t_{2\text{DM}}$ 为1240~349 Ma。当 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为最高的正值时(14.21)其 t_{DM} 和 $t_{2\text{DM}}$ 与岩石形成年龄一致,表明在349 Ma时存在一次地幔物质的加入。对于 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-4.66和-4.82的锆石, $t_{2\text{DM}}$ 集中于1394~1404 Ma,变化范围很小,说明花岗岩的形成中仍然存在时代至少为14亿年左右的地壳源区。

那拉提恰布河北二长花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为较大的正值,变化于7.77~14.14,绝大多数均大于10,反映新生地壳物质在花岗岩的形成中起主导作用,对应的 $t_{2\text{DM}}$ 变化于406~734 Ma,揭示出早泥盆世新生地壳和新元古代地壳为其主要源区。对于唯一的继承锆石,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为4.66, $t_{2\text{DM}}$ 为894 Ma,为新元古代地壳源区形成。

上述研究表明,晚泥盆世-石炭纪花岗岩主要源区亦有3种:一是 $t_{2\text{DM}}$ 介于10~17亿年的中新元古代混合源区;二是 $t_{2\text{DM}}$ 约为4亿年左右的早古生代新生地壳源区;三是与早石炭世早期与岩浆形成年龄一致的亏损地幔和古老地壳混合源区。

4.3 那拉提前寒武纪基底时代和组成

那拉提地区的前寒武纪基底最早称为那拉提群,为一套中深变质岩系,王作勋等(1990)根据1300~1500 Ma的变质年龄将其形成时代定为古元古代,王宝瑜等(1994)测得其中的阳起石片岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 1128 ± 125 Ma,认为那拉提群属中元古界。最近的区域地质编图均将其厘定为古元古界木札尔特岩群,但中国科学院地球化学研究所(杨学昌执笔,1985)^①对南木札尔特河破城子地区的木札尔河群中眼球状片麻岩中锆石 U-Pb 法的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为676 Ma,并将其解释为变质时代。

本次花岗岩锆石 Hf 同位素揭示花岗岩的源区包括了1200~1600 Ma的中元古代源区、700~1600 Ma中新元古代混合源区以及大于1900 Ma古老地壳源区,提供了那拉提地区的前寒武基底应包括新元古代、中元古代、古元古代乃至太古宙地层,表明那拉提地区前寒武基底组成复杂,值得进一步研究。

4.4 古老地壳增生事件和天山古生代洋陆转化

从花岗岩形成的源区分析,晚泥盆世及其以前的花岗岩,其 Hf 同位素研究均揭示出中元古代地壳、中新元古代地壳、古元古界古老地壳3种源区,除古元古代及以前古老地壳源区在花岗岩形成时 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为高的负值外,中元古代和中新元古代地壳源区 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主体以正值为主,揭示出中新元古代存在地壳增生事件。这两次地壳增生事件很有可能与16~18亿年和7~10亿年全球地幔增生事件吻合,只是由于花岗岩源区存在混合,造成 Hf 同位素模式年龄形成一定的分散。

关于天山古生代洋盆闭合的时限,前人一直存有较大的分歧。一种认为天山古生代洋盆在早石炭世初期已经闭合,石炭纪已转入大陆伸展背景(夏林圻等2002a,2002b;李向民等2002;Xia *et al.*,2004);第二种观点认为天山古生代洋盆晚二叠世前均处于岛弧构造背景(李曰俊等,2002,2005;Xiao *et al.*,2004,朱永峰等2005);第三种观点认为天山晚石炭世前为岛弧环境,晚石炭世后为裂谷环境(李锦轶等,1999)。基于花岗岩的年代格架及变形特征分析,奥陶-晚泥盆世花岗岩普遍经历了较强的变形,发育片麻理构造,而石炭纪花岗岩普遍未发生变形,暗示晚泥盆世存在一次重要构造事件,该事件可能代表了天山古生代洋盆洋陆转换的结束。石炭纪花岗岩的锆石 Hf 同位素揭示出早志留世和早石炭世初期两次地幔物质加入事件,前者是天山古生代洋盆俯冲强烈期,地幔物质强烈加入形成新生地壳,再部分熔融形成花岗岩;后者代表了早石炭世的地壳增生,这与西天山地区早石炭世火山岩大量出现相吻合,是碰撞造山带后大陆伸展强烈期地幔物质涌入的反映。

5 结论

(1)那拉提花岗岩浆活动可分为2个阶段。第一阶段为晚奥陶世至晚泥盆世,该类花岗岩的形成时

① 中国科学院地球化学研究所(杨学昌等执笔).1985.西南天山哈尔克山科学考察报告.251~253.

代介于 485~366 Ma,构成那拉提地区花岗岩的主体。该阶段花岗岩的主要特征是变形较强,发育弱的片麻理构造,第二阶段为石炭纪的岩体,形成年龄介于 352~320 Ma,一般变形很弱或无变形。那拉提构造带由西往东、由南往北,花岗岩的形成时代显示出逐渐变新的特点。

(2) 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $t_{2\text{DM}}$ 的研究揭示早奥陶世至晚泥盆世花岗岩主要有 3 种源区,一是 $t_{2\text{DM}}$ 介于 12~16 亿年的中元古代地壳源区;二是 $t_{2\text{DM}}$ 介于 7~16 亿年的中新元古代地壳混合源区;三是 $t_{2\text{DM}}$ 与岩石形成年龄接近或略大的亏损地幔新生地壳为主的地壳源区。晚泥盆世-石炭纪花岗岩亦主要有 3 种源区:一是 $t_{2\text{DM}}$ 介于 10~17 亿年的中新元古代混合源区;二是 $t_{2\text{DM}}$ 约为 4 亿年左右的早古生代新生地壳源区;三是与早石炭世早期与岩浆形成年龄一致的亏损地幔和古老地壳混合源区。

(3) 花岗岩锆石 Hf 同位素研究显示那拉提地区存在中新元古代的地壳增生事件,现划为古元古基底应包括新元古代、中元古代、古元古代乃至太古宙地质体,组成结构复杂,值得进一步研究。花岗岩年代学格架和变形特征揭示晚泥盆世可能代表了天山古生代洋陆转换的结束。锆石 Hf 同位素揭示出那拉提地区存在早志留世和早石炭世初期两次地幔物质加入事件,前者是天山古生代洋盆俯冲强烈期,地幔物质强烈加入形成新生地壳,再部分熔融形成花岗岩;后者代表了早石炭世的地壳增生,是碰撞造山带后大陆伸展强烈期地幔物质涌入的反映。

References

- Amelin Y, Lee D W and Halliday A N. 2000. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 4 205~4 225.
- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem. Geol.*, 192: 59~79.
- Blichert-Toft J and Albarade F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 148: 243~258.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Zhou Dingwu, et al. 2005. The discovery of Bindaban ophiolitic mélange in northern margin of Central Tianshan[J]. *Science in China(Series D)*, 35(6): 552~560(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, S E China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237~269.
- Han Baofu, He Guoqi, Wu Tairan, et al. 2004. The zircon U-Pb dating, geochemical characteristics and tectonic significance of early Paleozoic granites in Tianshan[J]. *Xinjiang Geology*, 22(1): 4~11(in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Zhang Guoxin and Chen Yibing. 2006. The Chronology and Geochemistry of Major Geological Events during the Crust Evolution in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Li Jinyi and Xiao Xuchang. 1999. The review on some questions about the tectonic evolution and crustal structure of Xinjiang, China[J]. *Science of Geology*, 34(4): 405~419(in Chinese with English abstract).
- Li Xiangmin, Dong Yunpeng, Xu Xueyi, et al. 2002. The discovery of ophiolitic mélange in Wuwamen area from southern margin of central Tianshan mountain[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 304~307(in Chinese with English abstract).
- Li Yuejun, Sun Longde, Wu Haoruo, et al. 2005. Permo-Carboniferous radiolarian from the Wupatarkan Group, west germinal of Chinese south Tianshan[J]. *Chinese Jour. Geol.*, 40(2): 220~226(in Chinese with English abstract).
- Li Yuejun, Wang Zhaoming, Mai Guangrong, et al. 2002. New discovery of radiolarian fossils from Aiktik Group in Tarim Basin and its significance[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 23(6): 496~500(in Chinese with English abstract).
- Ludwing K R. 2003. Isoplot 3.0—A geochronological toolkit for Microsoft Excel[A]. Berkeley Geochronology Center, Spec Pub[C]. 4: 1~70.
- Vervoort J D, Pachett P J, Gehrels G E, et al. 1996. Constrains on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes[J]. *Nature*, 379: 624~627.
- Wang Baoyu, Lang Zhiquan, Li Xiangdong, et al. 1994. Study on Geological Section in Western Tianshan, China[M]. Beijing: The Science Press, 72~166(in Chinese with English abstract).
- Wang Hongliang, Xu Xueyi, He Shiping, et al. 2008. 1:100M Geological Map of Tianshan and Adjacent Area[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Wang Zuoxun, Lü Xichao, Wu Jiye, et al. 1990. Multi-stage Tectonic Evolution and Mineralization of Tianshan[M]. Beijing: The Science Publishing House(in Chinese).
- Wu Changzhi, Zhang Zunzhong, Khin Zaw, et al. 2006. Geochronology, geochemistry and geological significance of Hongyuntan granite from Jultag area in Eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 121~1 134(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Scherer E E, Cameron K L and Blichert-toft J. 2000. Lu-Hf garnet geochronology: closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 3 413~3 432.
- Sun Guihua, Li Jinyi, Wang Degui, et al. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating and geological significance of granite and granodiorite from south Aqikekuduke faults area[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 945~952(in Chinese with English abstract).

- Tang Yaoqing, Gao Jun and Zhao Min. 1995. The Ophiolites and Blueschists from Southwestern Tianshan Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1~315 (in Chinese).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2002a. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks [J]. Geological bulletin of China, 21(5): 55~62 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2002b. Some thoughts on the characteristics of Paleozoic ocean-continent transition from Tianshan Mountain [J]. Northwestern Geology, 35(4): 9~20 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift volcanic rocks in the Tianshan Mountains, northwestern China [J]. Geological Society of America Bulletin, 116: 419~433.
- Xiao W J, Windley B F, Basarch G, *et al.* 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: implications for the lateral growth of Central Asia [J]. Journal of the Geological Society, London, 161: 339~342.
- Xu Ping, Wu Fuyuan, Xie Liewen, *et al.* 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating [J]. Chinese Science Bulletin, 49: 1 403~1 410 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tiannan, Li Jinyi, Sun Guihua, *et al.* 2006. Early Devonian continental arc in Central Tianshan: evidences from geochemistry and SHRIMP-U/Pb dating for granitic moltenite [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 41~48 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Gao Shan and Liu Xiaoming. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Geostand Newsl., 28: 353~370.
- Zhang Xiaomei, Wang Degui and Li Gang. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating from the east Shalong monzogranite in Kumtag, East Tianshan, Xinjiang, China [J]. Geological Bulletin of China, 25(8): 957~959 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zunzhong, Gu Lianxing, Yang Hao, *et al.* 2005. Characteristics and genesis of the Pingdingshan mega-augen gneissic granite in the eastern Tianshan Mountain areas [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 889~908 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, Xiong Xiaolin, *et al.* 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating for late Paleozoic volcanic rocks and shallow intrusive igneous rocks in north area from Western Tianshan [J]. Geochimica, 33(7): 317~327 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing, *et al.* 2005. SHRIMP chronology and the geochemistry of trace elements of Carboniferous volcanic rocks from Western Tianshan [J]. Chinese Science Bulletin, 50(18): 2 004~2 014 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zengwu, Mao Guilai, Wu liyun, *et al.* 2006. Declaration and significances of Carboniferous arc granite in Aqishan area from Eastern Tianshan [J]. Shaanxi Geology, 24(1): 27~36 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 董云鹏, 张国伟, 周鼎武, 等. 2005. 中天山北缘冰达坂蛇绿混杂岩的厘定及其构造意义 [J]. 中国科学 (D 辑), 35(6): 552~560.
- 韩宝福, 何国琦, 吴泰然, 等. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义 [J]. 新疆地质, 22(1): 4~11.
- 胡霏琴, 张国新, 陈义兵. 2006. 中国新疆地壳演化主要地质事件年代学和地球化学 [M]. 北京: 地质出版社.
- 李锦轶, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述 [J]. 地质科学, 34(4): 405~419.
- 李向民, 董云鹏, 徐学义, 等. 2002. 中天山南缘乌瓦门地区发现蛇绿混杂岩 [J]. 地质通报, 21(6): 304~307.
- 李曰俊, 孙龙德, 吴浩若, 等. 2005. 南天山西端乌帕塔尔坎群发现石炭-二叠纪放射虫化石 [J]. 地质科学, 40(2): 220~226.
- 李曰俊, 王招明, 买光荣, 等. 2002. 塔里木盆地艾提克群中放射虫化石及意义 [J]. 新疆石油地质, 23(6): 496~500.
- 孙桂华, 李锦轶, 王德贵, 等. 2006. 东天山阿其克库都克断裂南侧花岗岩和花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义 [J]. 地质通报, 25(8): 945~952.
- 王宝瑜, 郎智群, 李向东, 等. 1994. 中国天山西段地质剖面综合研究 [M]. 北京: 科学出版社, 72~166.
- 王洪亮, 徐学义, 何世平, 等. 2008. 1: 100 万天山及邻区地质图 [M]. 北京: 地质出版社.
- 王作勋, 吕喜朝, 郭继易, 等. 1990. 天山多旋回构造演化及成矿 [M]. 北京: 科学出版社.
- 吴昌志, 张遵忠, Khin Zaw, 等. 2006. 东天山觉罗塔格红云滩花岗岩年代学、地球化学及其构造意义 [J]. 岩石学报, 22(5): 1 121~1 134.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 汤耀庆, 高俊, 赵民. 1995. 西南天山蛇绿岩和蓝片岩 [M]. 北京: 地质出版社.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2002a. 天山古生代洋盆开启闭合时限的岩石学约束 [J]. 地质通报, 21(5): 55~62.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2002b. 天山古生代洋陆转化的几点思考 [J]. 西北地质, 35(4): 9~20.
- 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素 [J]. 科学通报, 49: 1 403~1 410.
- 杨天南, 李锦轶, 孙桂华, 等. 2006. 中天山早泥盆纪陆弧: 来自花岗岩质糜棱岩地球化学及 SHRIMP-U/Pb 定年证据 [J]. 岩石学报, 22(1): 41~48.
- 张晓梅, 王德贵, 李刚. 2006. 东天山库姆塔格沙垄东二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年 [J]. 地质通报, 25(8): 957~959.
- 张遵忠, 顾连兴, 杨浩, 等. 2005. 东天山平顶巨眼球状片麻状花岗岩特征及成因 [J]. 岩石学报, 21(3): 889~908.
- 赵振华, 白正华, 熊小林, 等. 2003. 西天山北部晚古生代火山-浅侵位岩浆岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年 [J]. 地球化学, 33(7): 317~327.
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究 [J]. 科学通报, 50(18): 2 004~2 014.
- 朱增伍, 毛归来, 吴丽云, 等. 2006. 东天山阿齐山地区石炭纪岛弧花岗岩的厘定及意义 [J]. 陕西地质, 24(1): 27~36.