

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.02.001

# 东天山大南湖—头苏泉岛弧带古生代侵入岩浆 活动期次及基底性质

庞博宸<sup>1</sup>, 李秋根<sup>1,\*</sup>, 陈隽璐<sup>2</sup>, 刘树文<sup>1</sup>, 王宗起<sup>3</sup>, 陈衍景<sup>1</sup>, 肖兵<sup>4</sup>

(1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国地质调查局  
西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;  
4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;)

**摘要:**锆石 U-Pb 定年结果显示:东天山大南湖—头苏泉岛弧带中酸性侵入岩形成时代为古生代,处于 465~265 Ma,可划分为 4 个期次。分别为:中奥陶世—晚志留世 465~413 Ma、中—晚泥盆世 391~377 Ma、石炭纪 327~308 Ma,以及早—中二叠世 284~269 Ma。锆石 Hf 同位素分析显示,锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 6.81~15.73, Hf 同位素二阶段模式年龄为 839~355 Ma,主要集中在 598~429 Ma;465~413 Ma 的侵入岩分布在卡拉塔格和大南湖,其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 11.34~15.20,相应的 Hf 同位素二阶段模式年龄为 633~467 Ma;391~377 Ma 的侵入岩分布于卡拉塔格,其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 6.81~13.32,相应的 Hf 同位素二阶段模式年龄为 839~497 Ma;327~308 Ma 的侵入岩分布在黄山西以及沁城南,其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 11.36~15.73,相应的 Hf 同位素二阶段模式年龄为 575~429 Ma;284~269 Ma 的侵入岩分布在土屋西和推克曼塔什,其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 8.94~14.51,相应的 Hf 同位素二阶段模式年龄是 671~355 Ma。再结合前人的研究成果揭示,在大南湖—头苏泉岛弧带底部可能存在老的地壳基底,并对这些岩浆活动有所贡献;该区古生代期间存在大约 465 Ma 早奥陶世以及 330 Ma 左右中石炭世 2 期地壳增生事件,并存在晚奥陶世—晚志留世、中—晚泥盆世和早—中二叠世三期地壳再造事件。

**关键词:**地壳演化;锆石 U-Pb 定年;锆石 Hf 同位素;大南湖—头苏泉岛弧带;东天山

**中图分类号:**P588.12

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-6248(2020)02-0001-26

## Paleozoic Intrusive Magmatic Activity and Basement Properties of the Dananhu-Tousuquan Island Arc in the Eastern Tianshan Mountains

PANG Bochen<sup>1</sup>, LI Qiugen<sup>1,\*</sup>, CHEN Junlu<sup>2</sup>, LIU Shuwen<sup>1</sup>, WANG Zongqi<sup>3</sup>,  
CHEN Yanjing<sup>1</sup>, XIAO Bing<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University,

收稿日期:2020-02-25;修回日期:2020-04-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)“新疆北部古弧盆体系成矿机理”项目(2014CB440801),中国地质调查局“准噶尔古生代增生造山的岩浆作用与成矿”项目(12120113041000),中国地质调查局“塔里木前寒武纪铁块成因类型及层控规律研究”项目(1212011140056)

作者简介:庞博宸(1994-),男,北京大学在读硕士,从事同位素地球化学研究。E-mail:949492755@qq.com

\* 通讯作者:李秋根(1973-),男,江西吉安人,副教授,博士生导师,从事前寒武纪地质学、岩石地球化学、独居石化学法测年及沉积大地构造学研究工作。E-mail:qgli@pku.edu.cn

Beijing 100871, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** Zircon U-Pb dating results show that the emplacement ages of intermediate-acid intrusive rocks in the Dananhu-Tousuquan island arc of the eastern Tianshan Mountains is between 465—265 Ma in the Paleozoic era. It can be divided into 4 periods: Middle Ordovician to Late Silurian (465—413 Ma), Middle Devonian (391—377 Ma), Carboniferous (327—308 Ma), and Early-Middle Permian (284—269 Ma). Zircon Hf isotope analysis shows that  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values range from 6.81 to 15.73 with the two-stage Hf model ages 839 Ma—355 Ma, mainly at 598 Ma—429 Ma. The intrusive rocks aged 465—413 Ma are distributed in Kalatage and Dananhu, with the  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values ranging from 11.34 to 15.20, and the two-stage Hf model ages ranging from 633 Ma to 467 Ma. The 391—377 Ma intrusive rocks occurred in the Karatag, with the  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  value ranging from 6.81 to 13.32, and two-stage Hf model ages ranging from 839 Ma to 497 Ma. The intrusive rocks dated 327—308 Ma are exposed in the west of Huangshan and south of Qincheng, with the  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  value ranging from 11.36 to 15.73, and the two-stage Hf model ages ranging from 575 Ma to 429 Ma. The intrusive rocks with ages of 284—269 Ma are distributed in the west of Tuwu and Tuikemantashi, with the  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  value ranging from 8.94 to 14.51, and the two-stage Hf model ages ranging from 671 Ma to 355 Ma. Combined with previous studies, this paper guesses that the old crustal basements beneath the Dananhu-Tou Suquan island arc contribute a lot to the paleozoic magmatic activities. In Palaeozoic era there were significant crustal accretion events near the Early Ordovician 465 Ma and the Middle Carboniferous 330 Ma in the arc, whereas in Late Ordovician-Late Silurian, Middle-Late Devonian and Early-Middle Permian crustal-reworking events occurred.

**Keywords:** crustal evolution; zircon U-Pb dating; zircon Hf isotopes; Dananhu-Tousuquan island arc; eastern Tianshan Mountains

## 0 引言

中亚造山带作为全球范围内规模最大的增生造山带之一,大量记录了显生宙以来陆壳增长过程(HAN et al., 2015; WINDLEY et al., 2007; CHEN et al., 2002)。中亚造山带也是一巨型缝合带,是由原处于西伯利亚古陆、中朝板块与塔里木板块三者之间的古亚洲洋俯冲消减而形成的(COLEMAN et al., 1989; XIAO et al., 2014)。前人的研究表明(WU et al., 2000; WU et al., 2011; JAHN, 2004),中亚造山带出露的中酸性火成岩普遍具有较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和较年轻的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄的特征,并以此作为中亚造山带连续地壳增生的证据。然而,最近, KRÖNER et al. (2014)通过对中亚造山带内大量的锆石年龄数据和 Nd-Hf 同位

素分析后认为,区域中许多新元古代到古生代花岗岩的岩浆来自老地壳物质的再造,即在造山带内地壳增生和地壳再造各自起着不同程度的作用。

东天山造山带位于中亚造山带南缘的天山造山带的最东段,在构造上位于西伯利亚板块、准噶尔-哈萨克斯坦板块和塔里木板块交汇部位,是古板块汇聚和地壳拼贴增生的重要区域(WINDLEY et al., 1990; XIAO et al., 2004; 李锦轶等, 2006)。在其演化过程中,经历了多期次的板块俯冲碰撞、板块汇聚-伸展、地壳洋陆转换等板块构造活动(秦克章等, 2002; 王京彬等, 2006; 陈希节等, 2016)。东天山很多区域严重地受到了像吐-哈盆地内那样的第四纪沉积物的覆盖,露头缺失或者出露较差,同时交通不便导致采样难度增加,其中在大南湖-头苏泉岛弧带的情况尤甚。受这些因素影响,岛弧带内依然缺乏足够的年代学数据以及更细致的地球化学数据,

从而导致岛弧带内部分地质问题仍存争议,尤其是在岛弧带基底性质和地壳演化方面(王银宏等,2014)。在东天山基底性质方面,李锦轶等(2004)、王京彬等(2006)认为大南湖-头苏泉岛弧带存在陆壳基底,大南湖-头苏泉岛弧带应属于陆缘弧;而XIAO et al. (2004)、秦克章等(2002)、肖兵等(2015)则认为不存在地壳基底,其应属于大洋岛弧。另外,有关该岛弧带的俯冲极性(WINDLEY et al., 1990;肖文交等,2006;李文明等,2002;宋彪等,2002;马星华等,2015)、碰撞时限(夏祖春等,2005;韩宝福等,2006)和岩浆源区及演化过程(肖兵等,2015;刘彬等,2016;王银宏等,2014)等问题依然没有达成共识。

作为自然界常见的一种副矿物,锆石因具有较低的吉布斯自由能(ELLISON et al., 1992),普遍存在于沉积岩、岩浆岩以及变质岩中,尤其富集于中酸性火成岩中。锆石具有较好的抗风化、抗干扰能力,富含 U、Th 等放射性元素,离子扩散速率低,封闭温度高等特点(WILDE et al., 2001),同时锆石矿物具有较高的 Hf 含量以及较低的 Lu/Hf 值,可以高程度地保留初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的信息(GRIFFIN et al., 2004),是开展 U-Pb 定年法和 Lu-Hf 同位素体系分析的理想对象(KEMP et al., 2006; ZEH et al., 2007)。碎屑锆石因其源区范围广泛,未必一定能反映其基底的属性(PIETRANIK et al., 2013; GASCHNIG et al., 2013),而岩浆岩的物源是直接源于其底部的地壳或者地幔物质,故岩浆岩中的锆石可以很好地反映其底部地壳或者地幔物质的地球化学特征。再者,与 Sm-Nd 同位素体系相比, Lu-Hf 同位素体系中的 $^{176}\text{Lu}$ 的半衰期(36 Ga)远小于 $^{147}\text{Sm}$ 的半衰期(108 Ga), Lu-Hf 体系可以更好地适用于年轻体系的研究(吴福元等,2007),且可以很好地反映源区的性质(GERDES et al., 2006; AMELIN et al., 1999; 侯可军等,2007)。如本次研究中的古生代侵入岩样品。

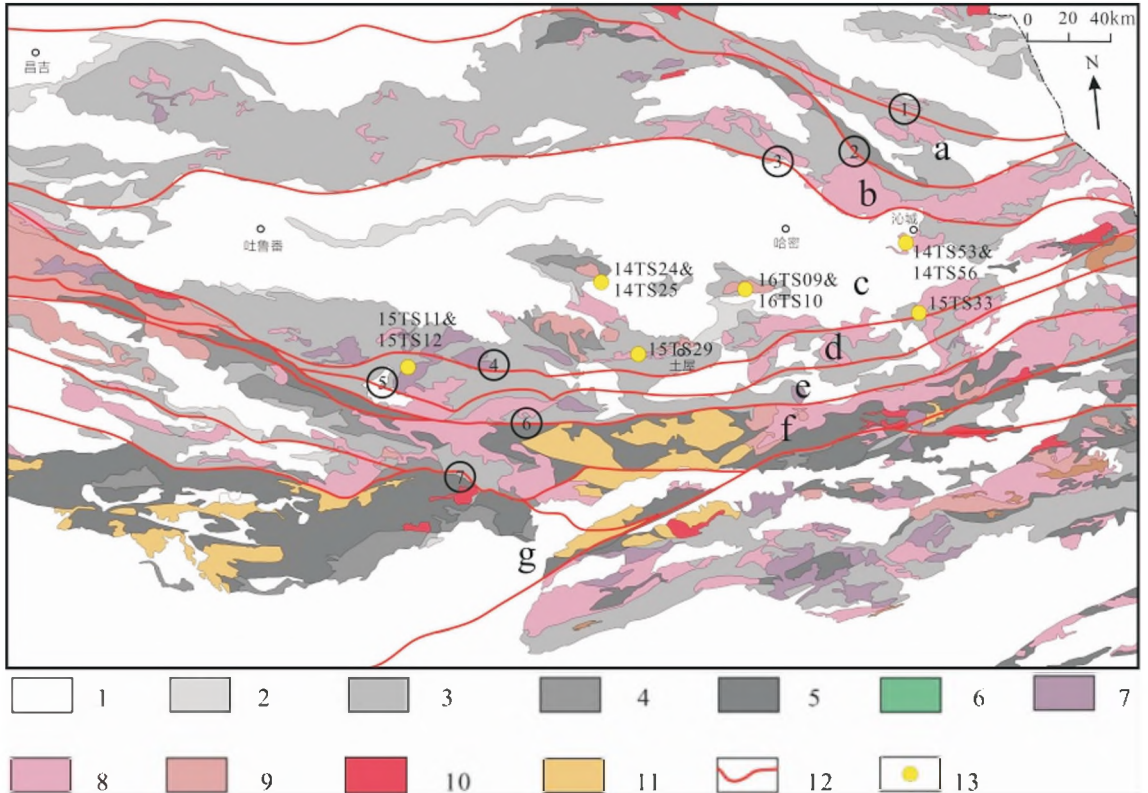
笔者拟通过对东天山造山带内的大南湖-头苏泉岛弧带出露的古生代侵入岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年以及其 LA-MC-ICP-MS Lu-Hf 同位素分析,确定这些古生代侵入岩的侵位时间和 Hf 同位素特征,厘定该区古生代时期的岩浆活动期次,揭示其地壳演化过程,并为限定大南湖-头苏泉岛弧带的基底属性提供重要依据。

## 1 区域地质背景和样品描述

### 1.1 研究区域地质背景

天山山脉位于亚洲大陆中部,近东西走向,绵延近 3 000 km,由古洋盆周围的几个构造单元聚合而成(XIAO et al., 2008; CHARVET et al., 2007; 李锦轶等,2006)。乌鲁木齐-库尔勒以东的天山山脉被称为东天山。东天山造山带位于中国新疆维吾尔自治区中部(图 1),从构造背景上来看,位于西伯利亚板块、准噶尔-哈萨克斯坦板块和塔里木板块的交汇部位。东天山北部以卡拉麦里断裂为界,与准格尔板块相邻。东天山整体呈东西向延伸,与内部大的断裂带走向基本一致。其内部从北向南的构造单元依次为:哈尔里克岛弧带(与南部单元以巴里坤断裂为界)、博格达-小铺构造带(与南部单元以沁城断裂为界)、大南湖-头苏泉岛弧带(与南部单元以康古尔塔格断裂为界)、康古尔塔格构造带(与南部单元以雅满苏-苦水断裂为界)和雅满苏岛弧带(与南部的中天山地块以阿其克库都克断裂为界)(周济元等,2001)。沁城断裂是位于巴里坤山南麓、吐-哈盆地北缘一系列断裂带的统称,断裂近北西向分布,长约 200 km;断裂带内主要岩石为石炭系砂岩、粉砂岩和少量第三系砂岩。康古尔塔格断裂全长约 700 km,中部较宽,最宽处可达 20 km,平均宽度约 10 km;断裂带的主体部分为中深层次的韧性剪切带,带中糜棱岩发育;主要地层为石炭纪的火山-沉积岩系地层。东天山地区自显生宙以来,大地构造演化方面经历了洋壳扩张、俯冲岛弧、弧后盆地和碰撞造山期及造山期后伸展 5 个阶段(韩春明等,2018),在其出露的岩体中,记录了大量古生代时期古洋盆收缩相关地质活动的证据。

本次研究区域主要集中在大南湖-头苏泉岛弧带(图 1)。大南湖-头苏泉岛弧带位于吐-哈盆地南缘,北部以沁城断裂为界与博格达-小铺构造带相邻,南部以康古尔塔格断裂为界与康古尔塔格构造带相邻,被认为大量保留了古亚洲洋板块俯冲以及弧陆碰撞等地质过程的关键证据。该岛弧带被认为从奥陶纪开始发育,在石炭世俯冲结束;岛弧带内的构造环境开始转换为碰撞环境,在二叠世处于后碰撞伸展环境(肖文交等,2006; WANG et al., 2018);岛弧内的岩浆活动主要集中在志留纪-石炭



1. 新生界; 2. 中生界; 3. 上古生界; 4. 下古生界; 5. 前寒武; 6. 中生代岩浆岩; 7. 二叠纪岩浆岩; 8. 石炭纪岩浆岩; 9. 泥盆纪岩浆岩; 10. 早古生代岩浆岩; 11. 前寒武岩浆岩; 12. 断裂带; 13. 采样点; ①. 卡拉麦里断裂; ②. 巴里坤断裂; ③. 沁城断裂; ④. 康古尔塔格断裂; ⑤. 雅满苏-苦水断裂; ⑥. 阿奇克库都克断裂; ⑦. 星星峡-卡布拉克断裂; a. 哈尔里克岛弧带; b. 博格达-小铺岛弧带; c. 大南湖-头苏泉岛弧带; d. 康古尔塔格构造带; e. 阿齐山-雅满苏岛弧带; f. 中天山地块; g. 塔里木板块

图 1 东天山区域地质图

Fig. 1 Geological map of the eastern Tianshan mountains

纪(QIN et al., 2002; 李锦轶等, 2004; 顾连兴等, 2006; 宋彪等, 2002)。岛弧带中发育有古生代地层, 由中-基性火成岩、酸性火成岩、火山沉积岩系、碎屑岩和灰岩等组成(徐学义等, 2005); 包括下泥盆统大南湖组和图拉尔根组、中上泥盆统头苏泉组、下石炭统脐山组等。大南湖组主要分布于卡拉塔格、大南湖、以及岛弧带东端, 其主要为海相火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩夹中基性火山熔岩和碳酸盐岩, 下部灰岩中含珊瑚、腕足化石。组内火山岩多为低钾钙碱性系列, 仅有少部分为拉斑系列, 表明其形成于岛弧环境。岛弧带内的头苏泉组主要出露于土屋延东等地区, 呈现为一套海相碎屑岩、火山碎屑岩及火山岩的组合; 主要岩性为凝灰岩、凝灰砂岩、硅质岩、粉砂岩夹英安斑岩、细粒安山岩等酸性火山岩, 下部多硅质、上部多火山灰成分。大南湖岛弧带侵入岩以花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩为主, 其记录最

早从中奥陶世(XIAO et al., 2004; 曹福根等, 2006)开始, 持续至二叠世前后(李锦轶等, 2006; 王伟等, 2019)。早古生代侵入岩具有岛弧钙碱性岩浆的特点, 属准铝质-弱过铝质系列, 同时微量元素及 Sr-Nd 同位素均表现出大洋岛弧的岩浆活动特征(曹福根等, 2006; 黄伟等, 2014)。晚古生代的侵入岩在岛弧带内分布广泛, 部分侵入岩在微量元素表现出富集大离子亲石元素与 Th、Zr、Hf 等元素, 亏损 Ba、Nb、Ti、P 等高场强元素, 指示其形成于碰撞构造环境。

区内矿床较为丰富, 有土屋铜矿(肖兵等, 2015)、延东铜矿、卡拉塔格红海矿区(毛启贵等, 2010)等。其中土屋-延东铜矿位于康古尔塔格断裂北约 4 km 处, 是新疆地区最大的斑岩型铜矿, 内部发育东西向和北西向断裂, 主要出露地层为石炭系的企鹅山组, 侏罗系的西山窑组和第四系。

## 1.2 样品岩性描述

为全面地了解大南湖-头苏泉岛弧带以及附近地区侵入岩的岩性和地球化学特征,本次研究共从 6 个区域采集了 10 个样品:14TS53、14TS56、15TS11、15TS12、15TS29、15TS33、14TS24、14TS25、16TS09、16TS10,多数样品均来自东天山大南湖岛弧带地区以及康古尔塔格断裂附近(图 1),显微镜下照片见图 2。其中样品 14TS24 与 14TS25 来自卡拉塔克地区,14TS24 采自南部的黄土坡南岩体,14TS25 来自卡拉塔克岩体;样品 16TS09 与 16TS10 来自南湖乡西南出露的岩体,以上 4 个样品均位于大南湖岛弧带的的中部,也是吐-哈盆地的中心区域。14TS53 和 14TS56 来自岛弧带东部,沁城南数千米的区域,2 个样品采样点相距约 7 km。其余样品均采于大南湖岛弧带南缘康古尔塔格断裂附近,由西向东依次是 15TS11 和 15TS12(位于推克曼塔什,其中样品 15TS11 是 15TS12 岩体中的包体)、15TS29(位于土屋以西地区)以及 15TS33(位于新疆黄山以西地区)。侵入岩岩体整体呈不规则状、岩株、岩枝状产出,呈现为多期次、多岩性的复合岩体。其中大南湖岩体在与围岩的接触边界上发生混合岩化,同时发育密集的中基性岩脉、岩墙。

闪长岩包括卡拉塔克岩体的 14TS25、大南湖岩体的 16TS10、沁城南的 14TS56 和推克曼塔什的 15TS11,主要矿物有斜长石(40%~50%)、碱性长石(20%~30%)与角闪石(15%~25%)。斜长石自形程度高,大小为 1~2 mm,呈板状,多见聚片双晶结构,部分发育低等程度的高岭土化蚀变,15TS11 中部分发育高等程度的绢云母化蚀变。碱性长石中可见微斜长石典型的格子双晶。角闪石多呈半自形,大小为 1 mm,多色性十分明显,14TS25 和 16TS10 中部分发育绿泥石化蚀变。

花岗闪长岩有采自黄土坡南岩体的样品 14TS24,主要矿物中有石英(20%~25%)、斜长石(40%~45%)、碱性长石(25%~35%)与角闪石(5%)。其中斜长石和碱性长石部分颗粒破碎严重,同时可见中等到高等程度的高岭土化蚀变。角闪石发育绢云母化以及少部分的绿泥石化。

二长花岗岩包括黄山西的 15TS33、大南湖岩体的 16TS09、土屋西的 15TS29 和推克曼塔什的 15TS12,主要矿物有石英(25%~30%)、斜长石

(30%~35%)、碱性长石(30%~35%)与黑云母(10%~15%)。石英粒径为 0.5~1 mm,自形到半自形,15TS33 中发育轻微蚀变,16TS09 石英晶体中可见较多的包裹体。长石粒径为 0.5~1 mm,自形程度高,发育斜长石的聚片双晶和微斜长石典型的格子双晶结构,发育一定程度的高龄土化蚀变现象,15TS12 中蚀变程度较高。黑云母与角闪石粒径大小为 0.5 mm 左右,呈半自形到他形,16TS09 中发育绿泥石化。

花岗斑岩有来自沁城南的样品 14TS53,斑晶占岩石 30%,其中包含石英(10%~15%)、碱性长石(10%~15%)与斜长石(5%~10%);基质主要由石英(20%)、长石(35%)与暗色矿物(15%)组成。斑晶大小为 2~4 mm,斑晶矿物颗粒普遍破碎,裂隙由绢云母化蚀变的物质填充。石英斑晶自形程度高,内部可见包裹的石英颗粒;碱性长石斑晶可见双晶结构;基质中,长石颗粒呈长柱状,具有一定的自形程度;角闪石颗粒发育中等程度的蚀变。

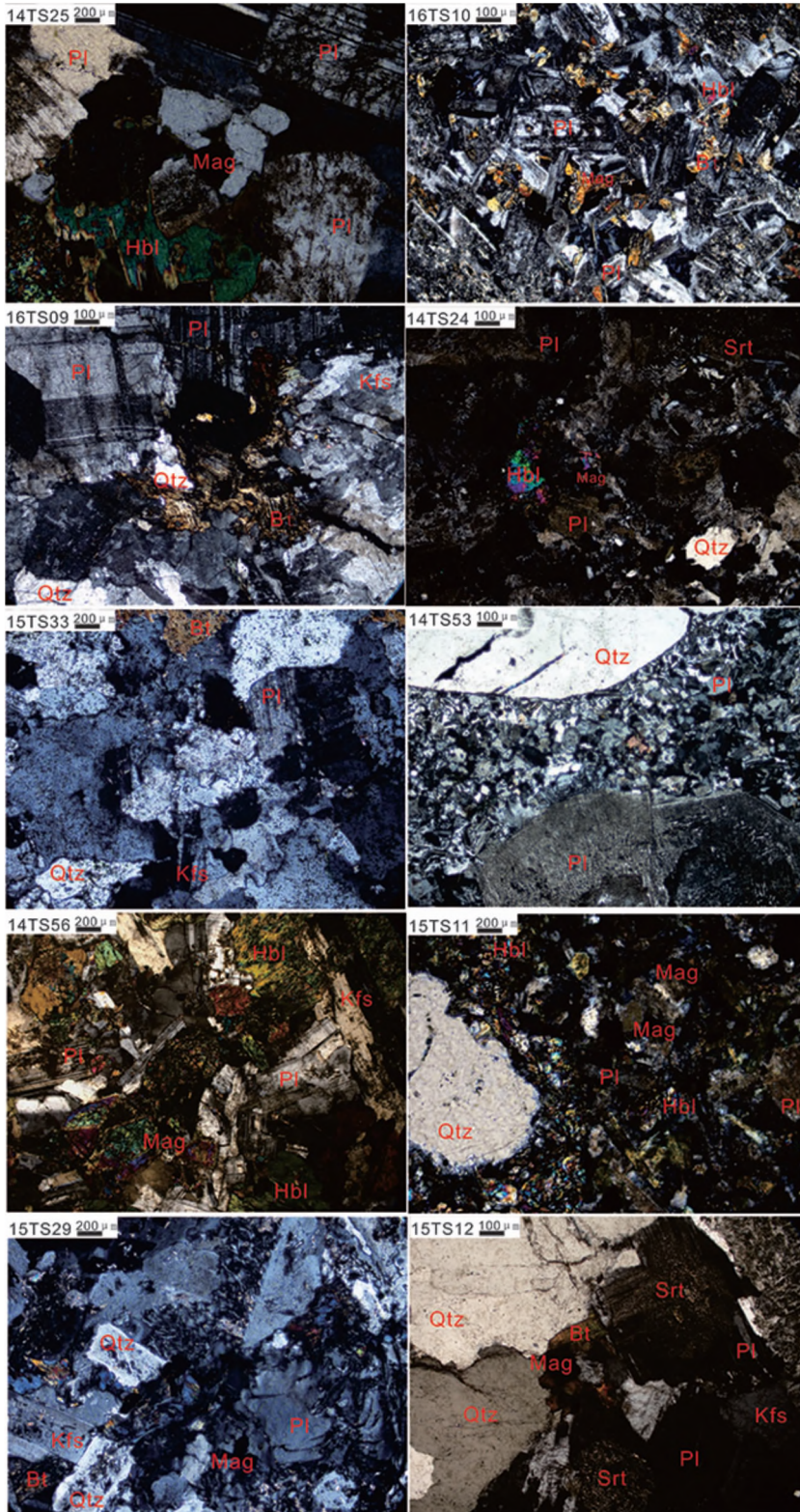
## 2 实验方法

### 2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析

对锆石进行人工破碎后采用重液和磁选分选锆石后,在双目显微镜下观测并人工挑选;将得到的锆石晶体与标样锆石一起用无色透明的环氧树脂固定成靶,等待其充分固定牢固后,对其进行抛光至露出锆石中心面。制靶完成后,拍摄锆石的阴极发光显微图像(CL 图像),在“北京大学造山带和地壳演化教育部重点实验室”使用热场发射环境扫描电镜 FEI Quanta 200F 完成拍摄,并利用 CL 图像确定测试点位置。

锆石的 U-Pb 同位素原位分析分析同样在“北京大学造山带和地壳演化教育部重点实验室”完成,测试仪器使用“美国 Agilent Technologies 公司”的电感耦合等离子体质谱仪“Agilent ICP-MS 7500ce”,激光烧蚀系统使用“德国 Coherent 公司”的准分子激光器“ComPexProl02”,激光束斑直径为 32  $\mu\text{m}$ ,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最优化(胡圣虹等,2001;侯可军,2007)。同位素组成用 91500 标准锆石进行外部校正,将标准锆石和实验样品穿插进行实验。





Qtz. 石英; Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石; Hbl. 角闪石; Bt. 黑云母; Mag. 磁铁矿; Srt-绢云母

图2 大南湖样品镜下照片

Fig. 2 Photomicrographs of samples of Dananhu

## 2.2 LA-MS-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素分析

Lu-Hf 同位素分析实验是在锆石 U-Pb 同位素分析的基础上进行的。根据 U-Pb 同位素分析的结果,挑选出谐和度比较高的锆石进行 Lu-Hf 同位素分析。实验在“中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完”完成。实验室采用“Thermo Fisher Scientific Neptune Plus MC-ICP-MS”,激光剥蚀系统为“GeoLas2005”。使用标准锆石 91500、GJ-1 与 Monastery 作为外部标样,三者<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 值的加权平均值分别为 0.282 304±0.000 004、0.282 010±0.000 008 和 0.282 673±0.000 007。为了扣除<sup>176</sup>Yb、<sup>176</sup>Lu 对<sup>176</sup>Hf 的同量异位干扰,测试中分别采用<sup>176</sup>Yb/<sup>176</sup>Yb=0.796 39 (FISHER 等,2014) 以及<sup>176</sup>Lu/<sup>175</sup>Lu=0.026 56(BLICHERT-Toft J 等,1997)进行标定。最后的数据分析(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)均采用软件“ICPMSDataCal”完成。获得数据后的计算方法如下。

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{Hf}}(0) &= \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_s / \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} - 1 \right] \times 10000 \\ \epsilon_{\text{Hf}}(t) &= \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{s,t} / \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR},t} - 1 \right] \times 10000 \\ &= \left\{ \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_s - \left( \frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_s \times (e^{\lambda t} - 1) \right] / \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} - \left( \frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1) \right] \right\} \times 10000 \\ T_{\text{DM}} &= 1/\lambda \times \ln \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_s - \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] / \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_s - \left( \frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{DMc}} &= t + 1/\lambda \times \ln \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{c,t} - \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM},t} \right] / \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{c,t} - \left( \frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM},t} \right] \right\} \\ &= t + 1/\lambda \times \ln \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_s - \left( \frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_s \times (e^{\lambda t} - 1) \right] - \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} - \left( \frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \times (e^{\lambda t} - 1) \right] \right\} / \left\{ \left[ \left( \frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_c \times e^{\lambda t} - \left( \frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM},t} \times e^{\lambda t} \right] \right\} \end{aligned}$$

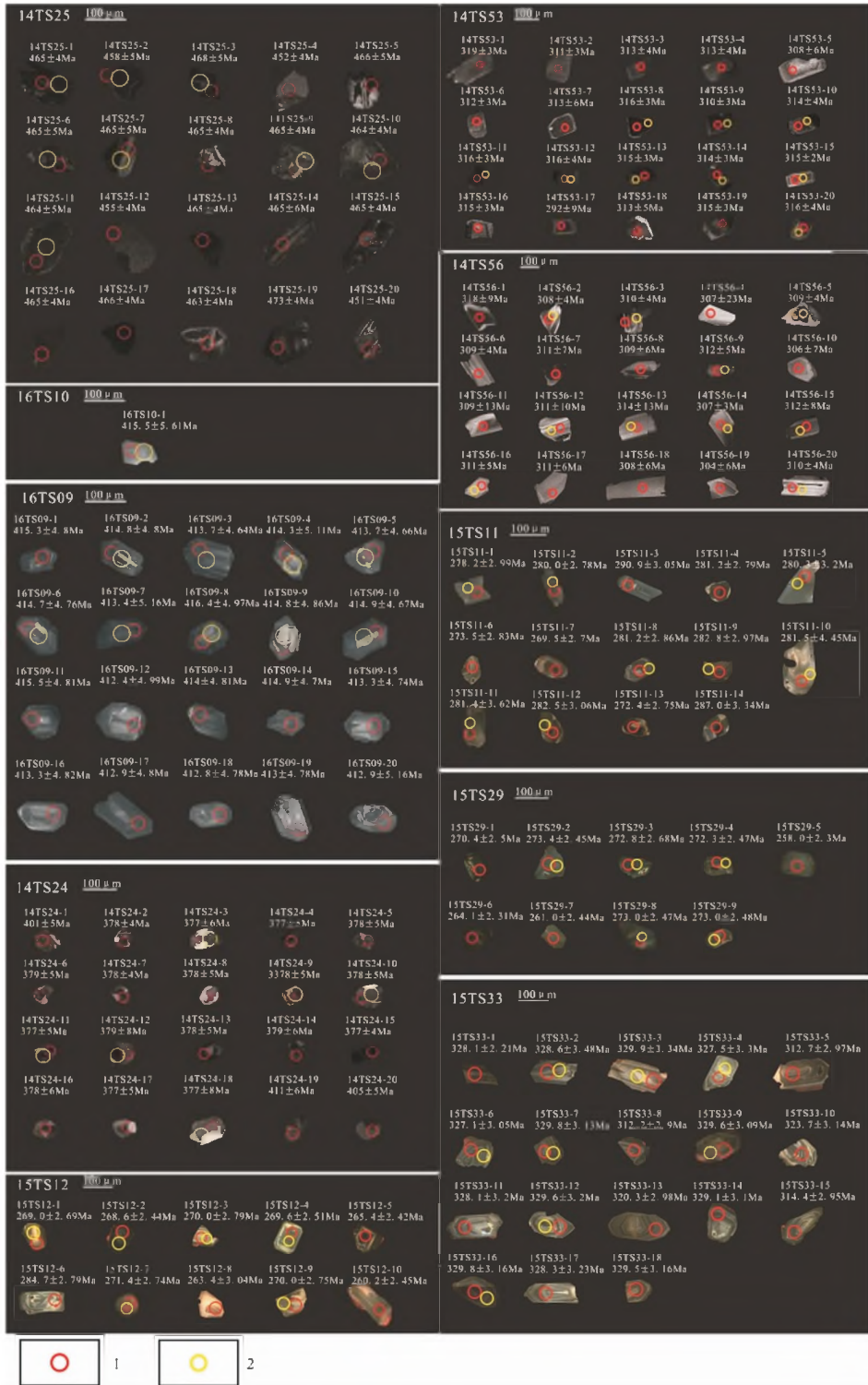
式中:s 代表样品;CHUR 代表球粒陨石;DM 代表亏损地幔;c 代表地壳;t 代表锆石结晶年龄; $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ ,<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf<sub>CHUR</sub> = 0.033 2,<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf<sub>CHUR</sub> = 0.282 772,<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf<sub>DM</sub> = 0.038 4,<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf<sub>DM</sub> = 0.283 25,<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf<sub>c</sub> = 0.015(吴福元等,2007)。

## 3 实验分析结果

所有 10 个样品的阴极发光图像(CL)及锆石 U-Pb 及 Lu-Hf 同位素分析的测试点位置见图 3。在形态上,锆石晶体自形程度较高,晶面简单,晶棱锋利、清晰,以长柱状或柱状为主,长轴长度为 70~200 μm,长宽比值主要集中为 1.0~3.0。在阴极发光图像(CL)中,锆石颗粒晶体洁净透明,发光程度整体较高,部分锆石晶体呈现出明显的震荡环带结构。在化学特征上,具有较高的 Th、U 的含量,且普遍具有大于 0.4 的 Th/U 值。以上特点均指示这些锆石为岩浆成因(李长民,2009)。锆石数据总览见表 1,锆石 U-Pb 及 Lu-Hf 同位素分析结果见

表 1 大南湖-头苏泉岛弧带样品分析结果表  
Tab. 1 Comprehensive results of Dananhu-Tousuquan Island Arc samples

样品号	岩性	地理位置	经纬度	谐和年龄 (Ma)	加权平均年龄 (Ma)	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM2}}$ (Ma)
14TS25	闪长岩	卡拉塔格	42°35'36"N,91°55'35"E	464.5±1.1	465.2±2.4	0.282 876~0.282 927	13.20~15.20	467~578
16TS10	闪长岩	大南湖	42°28'14"N,93°09'14"E	416±6	416±6	0.282 902	13.1	539
16TS09	二长花岗岩	大南湖	42°27'15"N,93°07'36"E	413.6±0.91	414.1±2.1	0.282 851~0.282 940	11.34~14.49	469~633
14TS24	花岗闪长岩	卡拉塔格	42°29'32"N,92°00'32"E	377.3±0.78	377.8±2.4	0.282 740~0.282 923	6.81~13.32	497~839
15TS33	二长花岗岩	黄山西	42°15'14"N,94°35'01"E	327.5±0.79	327.8±1.7	0.282 896~0.283 005	11.39~15.73	575~429
14TS53	花岗斑岩	沁城南	42°43'15"N,94°26'47"E	313.0±0.63	314.2±1.5	0.282 919~0.283 012	11.36~14.53	565~388
14TS56	闪长岩	沁城南	42°41'10"N,94°34'08"E	308.6±0.77	309.2±2.3	0.282 916~0.283 007	11.62~14.78	548~371
15TS11	闪长岩	推克曼塔什	42°05'05"N,90°21'54"E	281.4±0.71	282.4±2.4	0.282 866~0.282 912	8.94~10.76	671~571
15TS29	二长花岗岩	土屋西	42°03'51"N,92°14'45"E	271.4±0.92	272.2±2.0	0.283 06	14.51	355
15TS12	二长花岗岩	推克曼塔什	42°05'05"N,90°21'55"E	268.1±2.30	269.0±1.9	0.282 874~0.282 992	9.42~13.17	638~429



1. U-Pb 分析位置; 2. Hf 同位素分析位置

图 3 样品锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of representative zircons from the samples of Dananhu

表 2、表 3。图 4 展示了锆石 U-Pb 谐和图和<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄加权平均图, 谐和图中参与计算谐和年

龄的锆石用红色实线表示, 发生 Pb 丢失的锆石以及捕获锆石用虚线表示。锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  分布情况见图 5。



表 2 大南湖-头苏泉岛弧带样品锆石 U-Pb 分析结果  
Tab. 2 Results of U-Pb zircon dating for Dananhu samples

分析点	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
		年龄 (Ma)	$1\sigma$	年龄 (Ma)	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$
14TS53-1	0.618 5	319	3	339	36	0.053 25	0.001 38	0.372 96	0.009 26	0.050 81	0.000 56
14TS53-2	0.560 4	311	3	401	40	0.054 72	0.001 49	0.372 47	0.009 75	0.049 38	0.000 52
14TS53-3	0.518 2	313	4	336	43	0.053 16	0.001 58	0.364 78	0.010 39	0.049 78	0.000 58
14TS53-4	0.494 2	313	4	344	58	0.053 35	0.002 01	0.366 24	0.013 34	0.049 80	0.000 66
14TS53-5	0.436 7	308	6	402	91	0.054 74	0.003 15	0.369 64	0.020 57	0.048 98	0.000 92
14TS53-6	0.575 6	312	3	342	56	0.053 32	0.001 86	0.364 96	0.012 39	0.049 66	0.000 56
14TS53-7	0.490 5	313	6	344	106	0.053 36	0.003 51	0.366 24	0.023 26	0.049 79	0.001 05
14TS53-8	0.519 8	316	3	322	31	0.052 85	0.001 21	0.366 25	0.008 01	0.050 28	0.000 52
14TS53-9	0.561 9	310	3	310	40	0.052 57	0.001 46	0.357 47	0.009 47	0.049 33	0.000 56
14TS53-10	0.503 6	314	4	332	41	0.053 07	0.001 51	0.365 30	0.009 94	0.049 94	0.000 58
14TS53-11	0.527 3	316	3	323	52	0.052 87	0.001 75	0.366 03	0.011 75	0.050 23	0.000 57
14TS53-12	0.499 2	316	4	328	72	0.052 97	0.002 30	0.366 31	0.015 51	0.050 16	0.000 65
14TS53-13	0.523 2	315	3	322	29	0.052 84	0.001 17	0.364 48	0.007 66	0.050 04	0.000 51
14TS53-14	0.487 2	314	3	315	55	0.052 69	0.001 77	0.363 05	0.011 93	0.049 99	0.000 53
14TS53-15	0.478 8	315	3	321	41	0.052 82	0.001 43	0.364 64	0.009 58	0.050 09	0.000 50
14TS53-16	0.509 0	315	3	323	31	0.052 86	0.001 22	0.364 37	0.008 00	0.050 01	0.000 52
14TS53-17	0.546 7	292	9	378	172	0.054 16	0.005 76	0.346 49	0.035 57	0.046 41	0.001 53
14TS53-18	0.524 7	313	5	332	89	0.053 08	0.002 87	0.363 73	0.019 07	0.049 71	0.000 82
14TS53-19	0.527 8	315	3	332	31	0.053 08	0.001 22	0.366 07	0.008 00	0.050 03	0.000 52
14TS53-20	0.516 0	316	4	319	59	0.052 78	0.002 04	0.364 91	0.013 56	0.050 16	0.000 69
14TS56-1	1.449 4	318	9	430	139	0.055 44	0.004 88	0.386 92	0.032 86	0.050 62	0.001 45
14TS56-2	1.086 5	308	4	321	56	0.052 82	0.001 90	0.356 65	0.012 38	0.048 98	0.000 62
14TS56-3	1.134 6	310	4	322	42	0.052 83	0.001 54	0.358 86	0.010 00	0.049 27	0.000 57
14TS56-4	0.350 6	307	23	330	560	0.053 03	0.020 22	0.356 25	0.133 75	0.048 73	0.003 78
14TS56-5	0.918 5	309	4	325	72	0.052 91	0.002 39	0.358 31	0.015 64	0.049 12	0.000 72
14TS56-6	0.761 2	309	4	327	82	0.052 96	0.002 50	0.358 13	0.016 53	0.049 05	0.000 62
14TS56-7	1.281 1	311	7	350	107	0.053 50	0.003 59	0.364 79	0.023 62	0.049 46	0.001 07
14TS56-8	0.760 2	309	6	324	105	0.052 89	0.003 32	0.357 58	0.021 83	0.049 04	0.000 91
14TS56-9	0.479 6	312	5	314	154	0.052 66	0.004 38	0.359 67	0.029 49	0.049 54	0.000 86
14TS56-10	0.627 1	306	7	329	294	0.053 01	0.008 05	0.355 35	0.053 54	0.048 62	0.001 15
14TS56-11	0.656 1	309	13	325	271	0.052 91	0.008 56	0.358 59	0.056 51	0.049 16	0.002 13
14TS56-12	0.848 8	311	10	319	188	0.052 78	0.006 01	0.359 73	0.039 77	0.049 44	0.001 65
14TS56-13	0.539 1	314	13	314	361	0.052 66	0.011 51	0.362 58	0.078 10	0.049 95	0.002 19

续表 2

分析点	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
		年龄 (Ma)	$1\sigma$	年龄 (Ma)	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$
14TS56-14	1.098 2	307	3	318	42	0.052 74	0.001 53	0.355 11	0.009 89	0.048 84	0.000 56
14TS56-15	0.460 8	312	8	316	262	0.052 70	0.007 28	0.360 54	0.049 23	0.049 63	0.001 25
14TS56-16	0.422 0	311	5	319	205	0.052 78	0.005 59	0.359 78	0.037 76	0.049 45	0.00087
14TS56-17	0.666 7	311	6	353	118	0.053 58	0.003 66	0.364 77	0.024 34	0.049 39	0.00091
14TS56-18	0.388 5	308	6	325	204	0.052 90	0.005 75	0.356 99	0.038 31	0.048 95	0.00102
14TS56-19	0.842 0	304	6	349	99	0.053 47	0.003 25	0.356 21	0.021 00	0.048 33	0.00092
14TS56-20	0.841 5	310	4	320	70	0.052 80	0.002 27	0.358 83	0.014 97	0.049 30	0.00066
15TS11-1	0.682 2	278.2	2.99	296.5	75.40	0.052 25	0.001 77	0.317 75	0.010 53	0.044 11	0.000 48
15TS11-2	0.809 8	280.0	2.78	287.2	43.71	0.052 04	0.001 01	0.318 51	0.005 88	0.044 39	0.000 45
15TS11-3	0.950 7	290.9	3.05	291.8	55.41	0.052 15	0.001 29	0.331 88	0.007 90	0.046 16	0.000 49
15TS11-4	0.755 5	281.2	2.79	284.1	42.79	0.051 97	0.000 99	0.319 50	0.005 75	0.044 59	0.000 45
15TS11-5	0.506 6	280.3	3.20	295.9	68.25	0.052 24	0.001 60	0.320 08	0.009 48	0.044 44	0.000 52
15TS11-6	0.519 8	273.5	2.83	356.0	72.90	0.053 64	0.001 78	0.320 58	0.010 40	0.043 35	0.000 46
15TS11-7	0.581 1	269.5	2.70	343.5	44.15	0.053 35	0.001 05	0.314 02	0.005 91	0.042 69	0.000 44
15TS11-8	0.580 7	281.2	2.86	281.6	48.24	0.051 91	0.001 11	0.319 10	0.006 54	0.044 58	0.000 46
15TS11-9	0.555 6	282.8	2.97	286.7	61.28	0.052 03	0.001 42	0.321 72	0.008 54	0.044 85	0.000 48
15TS11-10	0.437 9	281.5	4.45	290.9	130.12	0.052 13	0.003 10	0.320 81	0.018 64	0.044 64	0.000 72
15TS11-11	0.416 5	281.4	3.62	289.8	96.08	0.052 10	0.002 26	0.320 44	0.013 57	0.044 61	0.000 59
15TS11-12	0.483 7	282.5	3.06	285.2	58.93	0.052 00	0.001 37	0.321 09	0.008 13	0.044 79	0.000 50
15TS11-13	0.579 5	272.5	2.75	362.1	44.26	0.053 79	0.001 07	0.320 18	0.006 05	0.043 17	0.000 45
15TS11-14	0.673 3	287.0	3.34	425.4	67.58	0.055 33	0.001 72	0.347 33	0.010 46	0.045 53	0.000 54
15TS12-1	0.604 9	269.0	2.69	278.7	51.74	0.051 85	0.001 19	0.304 57	0.006 68	0.042 61	0.000 44
15TS12-2	0.917 7	268.6	2.44	280.4	34.26	0.051 89	0.000 79	0.304 42	0.004 25	0.042 55	0.000 40
15TS12-3	0.410 8	270.0	2.79	272.3	55.08	0.051 70	0.001 26	0.304 89	0.007 12	0.042 77	0.000 45
15TS12-4	0.816 4	269.6	2.51	279.6	46.61	0.051 87	0.001 07	0.305 39	0.006 03	0.042 70	0.000 41
15TS12-5	0.679 3	265.4	2.42	328.2	45.24	0.052 99	0.001 07	0.30702	0.005 95	0.042 02	0.00039
15TS12-6	0.403 0	284.7	2.79	289.6	46.55	0.052 10	0.001 08	0.324 30	0.006 35	0.045 15	0.000 45
15TS12-7	0.625 4	271.4	2.74	268.9	49.21	0.051 63	0.001 13	0.306 06	0.006 32	0.042 99	0.000 44
15TS12-8	0.5938	263.4	3.04	341.3	68.66	0.053 29	0.001 65	0.306 47	0.009 12	0.041 71	0.000 49
15TS12-9	0.533 2	270.0	2.75	278.2	61.07	0.051 84	0.001 41	0.305 70	0.008 03	0.042 77	0.00044
15TS12-10	0.958 7	260.2	2.45	357.1	39.32	0.053 67	0.000 94	0.304 77	0.005 01	0.041 19	0.00040
15TS29-1	1.221 9	270.4	2.50	294.4	38.47	0.052 21	0.000 89	0.308 42	0.004 93	0.042 84	0.000 40
15TS29-2	1.333 5	273.4	2.45	278.2	41.02	0.051 84	0.000 94	0.309 63	0.005 34	0.043 32	0.000 40
15TS29-3	0.842 1	272.8	2.68	282.1	44.28	0.051 92	0.001 02	0.309 53	0.005 72	0.043 23	0.000 43

续表 2

分析点	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
		年龄 (Ma)	$1\sigma$	年龄 (Ma)	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$
15TS29-4	0.906 0	272.3	2.47	294.5	35.09	0.052 21	0.00081	0.310 59	0.004 49	0.04314	0.000 40
15TS29-5	1.166 1	258.0	2.30	338.0	30.43	0.053 22	0.000 72	0.299 69	0.003 72	0.040 84	0.000 37
15TS29-6	1.399 6	264.1	2.31	362.9	27.30	0.053 81	0.000 65	0.310 25	0.003 39	0.041 81	0.000 37
15TS29-7	0.934 9	261.0	2.44	383.5	36.64	0.054 30	0.000 90	0.309 44	0.00475	0.041 32	0.000 39
15TS29-8	0.953 0	273.0	2.47	293.3	35.22	0.052 18	0.000 81	0.311 27	0.004 52	0.043 26	0.000 40
15TS29-9	0.820 4	271.2	2.48	275.5	38.59	0.051 78	0.000 88	0.306 75	0.004 91	0.042 97	0.000 40
15TS33-1	0.960 3	228.1	2.21	690.8	40.62	0.062 49	0.001 21	0.310 42	0.005 67	0.036 02	0.000 36
15TS33-2	0.540 3	328.6	3.48	328.6	58.26	0.053 00	0.001 39	0.382 20	0.009 60	0.052 30	0.000 57
15TS33-3	0.873 9	329.9	3.34	335.8	47.69	0.053 16	0.001 14	0.384 95	0.007 82	0.052 51	0.000 55
15TS33-4	0.487 7	327.5	3.30	334.1	46.67	0.053 12	0.001 11	0.381 84	0.007 58	0.052 12	0.000 54
15TS33-5	0.674 6	312.7	2.97	323.4	38.15	0.052 88	0.000 90	0.362 38	0.005 78	0.049 70	0.000 48
15TS33-6	0.334 3	327.1	3.05	337.3	34.96	0.053 20	0.000 83	0.381 90	0.005 55	0.052 06	0.000 50
15TS33-7	0.635 7	329.8	3.13	330.1	39.99	0.053 03	0.000 95	0.383 95	0.006 47	0.052 50	0.000 51
15TS33-8	0.450 6	312.2	2.90	313.6	34.46	0.052 65	0.000 81	0.360 30	0.005 12	0.049 63	0.000 47
15TS33-9	0.475 2	329.6	3.09	337.4	35.80	0.053 20	0.000 85	0.384 89	0.005 74	0.052 46	0.000 50
15TS33-10	0.664 1	323.7	3.14	358.4	41.66	0.053 70	0.000 99	0.381 38	0.006 59	0.051 50	0.000 51
15TS33-11	0.428 7	328.1	3.19	334.8	42.28	0.053 14	0.001 01	0.382 68	0.006 85	0.052 22	0.000 52
15TS33-12	0.540 4	329.6	3.20	327.7	41.89	0.052 98	0.000 99	0.383 22	0.006 78	0.052 46	0.000 52
15TS33-13	0.554 3	320.3	2.98	364.7	35.40	0.053 85	0.000 84	0.378 30	0.005 50	0.050 94	0.000 49
15TS33-14	0.388 5	329.1	3.10	329.8	36.37	0.053 03	0.000 86	0.383 04	0.005 80	0.052 38	0.000 51
15TS33-15	0.579 5	314.4	2.95	383.8	35.73	0.054 31	0.000 87	0.374 39	0.005 62	0.049 99	0.000 48
15TS33-16	0.414 3	329.8	3.16	336.2	40.58	0.053 17	0.000 97	0.384 87	0.006 60	0.052 48	0.000 52
15TS33-17	0.366 5	328.3	3.23	334.2	47.17	0.053 13	0.001 12	0.382 84	0.007 73	0.052 25	0.000 53
15TS33-18	0.672 8	329.5	3.16	336.9	38.30	0.053 19	0.000 91	0.384 72	0.006 17	0.052 45	0.000 52
14TS24-1	0.587 7	401	5	475.0	11.00	0.067 49	0.001 95	0.596 56	0.016 66	0.064 13	0.000 75
14TS24-2	0.998 9	378	4	378.0	10.00	0.054 33	0.001 74	0.451 66	0.014 06	0.060 32	0.000 71
14TS24-3	0.565 7	377	6	379.0	31.00	0.054 51	0.005 30	0.452 72	0.043 70	0.060 26	0.000 97
14TS24-4	0.654 7	377	5	381.0	20.00	0.054 81	0.003 45	0.455 50	0.028 38	0.060 30	0.000 79
14TS24-5	0.752 7	378	5	380.0	19.00	0.054 56	0.003 38	0.453 68	0.027 67	0.060 34	0.000 89
14TS24-6	0.872 2	379	5	380.0	17.00	0.054 44	0.002 94	0.454 11	0.024 14	0.060 52	0.000 83
14TS24-7	1.031 2	378	4	378.0	14.00	0.054 23	0.002 45	0.451 12	0.020 05	0.060 36	0.000 72
14TS24-8	0.728 0	378	5	381.0	18.00	0.054 61	0.003 14	0.454 97	0.025 93	0.060 45	0.000 75
14TS24-9	0.645 2	378	5	380.0	13.00	0.054 48	0.002 35	0.453 38	0.019 19	0.060 38	0.000 77
14TS24-10	0.669 6	378	5	378.0	29.00	0.054 23	0.005 05	0.450 86	0.041 74	0.060 33	0.000 85

续表 2

分析点	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
		年龄 (Ma)	$1\sigma$	年龄 (Ma)	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$
14TS24-11	0.612 6	377	5	379.0	13.00	0.054 45	0.002 31	0.451 95	0.018 69	0.060 23	0.000 81
14TS24-12	0.772 1	379	8	383.0	27.00	0.054 86	0.004 72	0.458 06	0.038 65	0.060 58	0.001 32
14TS24-13	0.749 9	378	5	378.0	17.00	0.054 29	0.002 96	0.451 63	0.024 24	0.060 36	0.000 85
14TS24-14	0.788 4	379	6	382.0	23.00	0.054 72	0.004 05	0.456 50	0.033 29	0.060 54	0.001 02
14TS24-15	1.016 6	377	4	379.0	15.00	0.054 54	0.002 61	0.452 71	0.021 38	0.060 23	0.000 70
14TS24-16	0.913 9	378	6	379.0	16.00	0.054 25	0.002 83	0.452 12	0.023 07	0.060 47	0.000 95
14TS24-17	0.940 3	377	5	377.0	11.00	0.054 20	0.001 94	0.450 12	0.015 70	0.060 26	0.000 75
14TS24-18	0.608 6	377	8	380.0	42.00	0.054 64	0.007 34	0.453 31	0.060 34	0.060 20	0.001 39
14TS24-19	0.599 9	411	6	849.0	16.00	0.144 33	0.004 22	1.308 20	0.036 01	0.065 77	0.000 94
14TS24-20	0.749 6	405	5	406.0	18.00	0.054 95	0.002 98	0.491 65	0.026 41	0.064 92	0.000 79
14TS25-1	0.236 4	465	4	465.0	5.00	0.056 35	0.000 87	0.580 66	0.008 46	0.074 75	0.000 72
14TS25-2	0.347 2	458	5	463.0	7.00	0.056 95	0.001 09	0.577 75	0.010 48	0.073 60	0.000 76
14TS25-3	0.456 8	468	5	475.0	10.00	0.057 43	0.001 49	0.595 85	0.015 04	0.075 27	0.000 77
14TS25-4	0.298 2	452	4	554.0	6.00	0.072 50	0.001 13	0.726 33	0.010 68	0.072 69	0.000 70
14TS25-5	0.308 3	466	5	468.0	13.00	0.056 74	0.001 93	0.585 87	0.019 59	0.074 91	0.000 81
14TS25-6	0.474 3	465	5	465.0	7.00	0.056 39	0.001 12	0.580 82	0.010 98	0.074 73	0.000 76
14TS25-7	0.305 1	465	5	465.0	10.00	0.056 38	0.001 62	0.581 03	0.016 27	0.074 77	0.000 79
14TS25-8	0.338 7	465	4	466.0	6.00	0.056 42	0.000 98	0.581 75	0.009 55	0.074 80	0.000 74
14TS25-9	0.264 3	465	4	466.0	8.00	0.056 60	0.001 25	0.583 08	0.012 46	0.074 74	0.000 75
14TS25-10	0.524 7	464	4	465.0	7.00	0.056 47	0.001 05	0.581 16	0.010 41	0.074 67	0.000 72
14TS25-11	0.596 8	464	5	465.0	7.00	0.056 46	0.001 10	0.580 78	0.010 86	0.074 63	0.000 76
14TS25-12	0.444 7	455	4	518.0	6.00	0.066 07	0.001 04	0.665 66	0.009 83	0.073 10	0.000 72
14TS25-13	0.550 2	465	4	465.0	6.00	0.056 35	0.000 95	0.580 94	0.009 30	0.074 80	0.000 74
14TS25-14	0.383 3	465	6	467.0	12.00	0.056 62	0.001 80	0.584 30	0.018 00	0.074 87	0.000 93
14TS25-15	0.423 2	465	4	504.0	6.00	0.062 36	0.001 07	0.643 05	0.010 45	0.074 81	0.000 74
14TS25-16	0.800 7	465	4	467.0	6.00	0.056 62	0.000 90	0.583 84	0.008 81	0.074 81	0.000 72
14TS25-17	0.688 0	466	4	467.0	5.00	0.056 62	0.000 81	0.584 59	0.007 79	0.074 91	0.000 71
14TS25-18	0.251 1	463	4	545.0	7.00	0.069 19	0.001 18	0.709 80	0.011 38	0.074 43	0.000 75
14TS25-19	0.704 7	473	4	486.0	6.00	0.058 59	0.001 02	0.614 32	0.010 15	0.076 08	0.000 74
14TS25-20	0.490 7	451	4	461.0	9.00	0.057 56	0.001 39	0.574 75	0.013 49	0.072 44	0.000 73
16TS09-1	0.494 5	415.3	4.75	416.9	9.35	0.055 31	0.001 53	0.507 71	0.013 88	0.066 55	0.000 79
16TS09-2	0.535 4	414.8	4.77	414.9	8.65	0.055 06	0.001 42	0.504 80	0.012 82	0.066 47	0.000 79
16TS09-3	0.432 6	413.7	4.64	414.9	8.86	0.055 20	0.001 46	0.504 69	0.013 12	0.066 28	0.000 77
16TS09-4	0.398 4	414.3	5.11	416.8	11.72	0.055 43	0.001 93	0.507 51	0.017 39	0.066 38	0.000 85



续表 2

分析点	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
		年龄 (Ma)	1 $\sigma$	年龄 (Ma)	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$
16TS09-5	0.563 8	413.7	4.66	414.9	7.59	0.055 22	0.001 25	0.504 80	0.011 24	0.066 28	0.000 77
16TS09-6	0.571 7	414.7	4.76	415.3	8.08	0.055 13	0.001 33	0.505 31	0.011 97	0.066 45	0.000 79
16TS09-7	0.604 6	413.4	5.16	415.5	9.74	0.055 34	0.001 62	0.505 63	0.014 44	0.066 24	0.000 85
16TS09-8	0.4988	416.4	4.97	417.5	9.24	0.055 26	0.001 52	0.508 64	0.013 73	0.066 73	0.000 82
16TS09-9	0.577 2	414.8	4.86	415.8	8.82	0.055 21	0.001 45	0.506 03	0.013 08	0.066 45	0.000 80
16TS09-10	0.563 7	414.9	4.67	415.7	8.01	0.055 17	0.001 32	0.505 92	0.011 88	0.066 49	0.000 77
16TS09-11	0.465 7	415.5	4.81	415.1	9.58	0.055 01	0.001 57	0.505 09	0.014 21	0.066 57	0.000 80
16TS09-12	0.541 5	412.4	4.99	413.6	9.25	0.055 19	0.001 54	0.502 84	0.013 69	0.066 06	0.000 82
16TS09-13	0.610 3	414.0	4.81	412.3	9.31	0.054 75	0.001 53	0.500 82	0.013 75	0.066 33	0.000 80
16TS09-14	0.619 7	414.9	4.70	413.9	7.58	0.054 90	0.001 25	0.503 32	0.011 22	0.066 47	0.000 78
16TS09-15	0.509 9	413.3	4.74	414.9	7.85	0.055 28	0.001 30	0.504 78	0.011 63	0.066 21	0.000 78
16TS09-16	0.621 4	413.3	4.82	414.6	9.52	0.055 21	0.001 57	0.504 22	0.014 10	0.066 22	0.000 80
16TS09-17	0.552 5	412.9	4.80	413.7	8.76	0.055 13	0.001 45	0.502 95	0.012 97	0.066 15	0.000 79
16TS09-18	0.654 5	412.8	4.78	414.8	9.70	0.055 33	0.001 60	0.504 66	0.014 37	0.06614	0.000 79
16TS09-19	0.475 7	413.0	4.78	413.5	9.54	0.055 08	0.001 57	0.502 66	0.014 12	0.066 17	0.000 79
16TS09-20	0.429 3	412.9	5.16	414.6	10.65	0.055 28	0.001 76	0.504 25	0.015 78	0.066 14	0.000 85
16TS10-1	0.464 8	415.5	5.61	415.2	16.69	0.055 02	0.002 72	0.505 22	0.024 74	0.066 58	0.000 93
16TS10-2	0.515 2	407.3	5.89	474.5	13.26	0.066 21	0.002 37	0.595 62	0.020 83	0.065 22	0.000 97
16TS10-3	0.678 5	498.8	8.75	993.5	24.31	0.149 64	0.005 97	1.660 37	0.063 69	0.080 44	0.001 47
16TS10-4	0.377 2	380.0	5.22	439.1	11.65	0.064 60	0.002 15	0.541 05	0.017 68	0.060 72	0.000 86

注:测试单位为“北京大学造山带和地壳演化教育部重点实验室”。

表 3 大南湖-头苏泉岛弧带样品锆石 Lu-Hf 分析结果  
Tab. 3 Zircon Hf isotopic data of Dananhu sample

分析点	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$		$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$		$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}$	$T_{\text{DM2}}$
		比值	1 $\sigma$	比值	1 $\sigma$				
14TS53-8	316.2	0.004 377	0.000 079 6	0.283 012	0.000 032 3	8.49	14.53	373.4	388.8
14TS53-9	310.4	0.004 438	0.000 129 5	0.282 981	0.000 032 9	7.38	13.30	423.0	453.1
14TS53-10	314.1	0.004 495	0.000 139 8	0.282 924	0.000 032 4	5.38	11.36	512.1	564.6
14TS53-11	315.9	0.003 686	0.000 018 5	0.282 919	0.000 022 5	5.20	11.38	508.3	565.1
14TS53-12	315.5	0.003 811	0.000 149 3	0.282 973	0.000 025 7	7.11	13.26	427.1	459.5
14TS53-13	314.8	0.004 096	0.000 082 2	0.282 952	0.000 031 9	6.37	12.45	462.9	504.4
14TS53-14	314.4	0.002 935	0.000 032 3	0.282 963	0.000 024 3	6.76	13.07	431.7	469.6
14TS53-15	315.0	0.003 934	0.000 083 8	0.282 949	0.000 026 2	6.27	12.39	465.1	508.0

续表 3

分析点	年龄(Ma)	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$		$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$		$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}$	$T_{\text{DM2}}$
		比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$				
14TS53-20	315.5	0.003 407	0.000 054 4	0.282 922	0.000 027 9	5.31	11.55	499.4	555.5
14TS56-2	308.2	0.004 315	0.000 065 9	0.282 950	0.000 031 6	6.31	12.21	468.7	512.3
14TS56-3	310.0	0.002 854	0.000 120 0	0.282 958	0.000 026 6	6.57	12.81	438.5	480.4
14TS56-5	309.1	0.002 080	0.000 099 6	0.282 972	0.000 028 0	7.07	13.45	408.4	443.6
14TS56-9	311.7	0.000 995	0.000 059 5	0.282 936	0.000 020 1	5.80	12.45	447.8	501.6
14TS56-12	311.1	0.001 780	0.000 034 2	0.283 007	0.000 028 8	8.30	14.78	354.8	370.9
14TS56-13	314.2	0.001 228	0.000 083 2	0.282 924	0.000 030 5	5.38	12.04	467.6	526.9
14TS56-14	307.4	0.003 025	0.000 062 7	0.282 977	0.000 025 5	7.23	13.39	412.4	446.0
14TS56-15	312.2	0.001 121	0.000 025 6	0.282 962	0.000 0243	6.74	13.38	411.6	450.4
14TS56-16	311.1	0.000 936	0.000 041 5	0.282 912	0.000 020 9	4.97	11.62	480.4	547.6
14TS56-20	310.2	0.001 279	0.000 030 3	0.282 951	0.000 026 8	6.31	12.88	430.4	476.6
15TS11-1	278.2	0.003 149	0.000 067 4	0.282 868	0.000 018 4	3.40	8.94	577.1	671.2
15TS11-2	280.0	0.005 529	0.000 142 4	0.282 913	0.000 036 4	4.98	10.12	546.5	606.9
15TS11-5	280.3	0.002 041	0.000 030 4	0.282 887	0.000 019 8	4.05	9.84	532.7	622.6
15TS11-8	281.2	0.002 247	0.000 024 9	0.282 873	0.000 020 6	3.59	9.35	555.1	650.5
15TS11-9	282.8	0.001 232	0.000 009 5	0.282 888	0.000 016 8	4.11	10.10	518.9	610.1
15TS11-10	281.5	0.001 236	0.000 030 3	0.282 908	0.000 018 3	4.80	10.77	490.9	571.8
15TS11-11	281.4	0.001 579	0.000 076 1	0.282 866	0.000 027 1	3.31	9.20	556.4	659.0
15TS11-12	282.5	0.002 026	0.000 042 7	0.282 909	0.000 026 0	4.83	10.67	500.4	578.1
15TS12-1	269.0	0.001 287	0.000 038 5	0.282 940	0.000 031 0	5.95	11.64	445.1	512.8
15TS12-2	268.6	0.003 167	0.000 110 5	0.282 992	0.000 042 7	7.76	13.11	391.5	430.2
15TS12-3	270.0	0.001 682	0.000 106 3	0.282 955	0.000 029 1	6.46	12.10	429.2	488.0
15TS12-4	269.6	0.002 263	0.000 019 5	0.282 952	0.000 032 3	6.38	11.91	439.2	498.2
15TS12-7	271.4	0.002 316	0.000 053 5	0.282 987	0.000 031 7	7.62	13.17	388.5	429.0
15TS12-9	270.0	0.000 676	0.000 017 5	0.282 874	0.000 026 3	3.60	9.42	531.4	637.7
15TS29-3	272.8	0.009 308	0.000 410 0	0.283 060	0.000 086 3	10.19	14.51	348.5	355.0
15TS33-2	328.6	0.002 228	0.000 077 6	0.282 969	0.000 037 6	6.98	13.73	414.0	443.8
15TS33-3	329.9	0.001 185	0.000 048 5	0.282 896	0.000 031 7	4.38	11.39	507.1	575.9
15TS33-4	327.5	0.001 491	0.000 035 3	0.282 935	0.000 030 6	5.77	12.66	454.8	502.8
15TS33-6	327.1	0.002 536	0.000 028 0	0.282 976	0.000 032 9	7.21	13.87	407.7	434.9
15TS33-7	329.8	0.002 369	0.000 046 4	0.282 916	0.000 032 2	5.11	11.85	493.6	550.0
15TS33-9	329.6	0.002 246	0.000 033 2	0.282 977	0.000 029 4	7.23	14.00	403.6	429.4
15TS33-12	329.6	0.002 249	0.000 100 4	0.282 961	0.000 045 8	6.67	13.43	427.2	461.2
15TS33-16	329.8	0.001 604	0.000 027 1	0.282 940	0.000 033 4	5.93	12.84	449.8	494.5
14TS24-1-1	394	0.002 447	0.000 063 0	0.282 824	0.000 080 0	1.84	9.88	630.9	694.2

续表 3

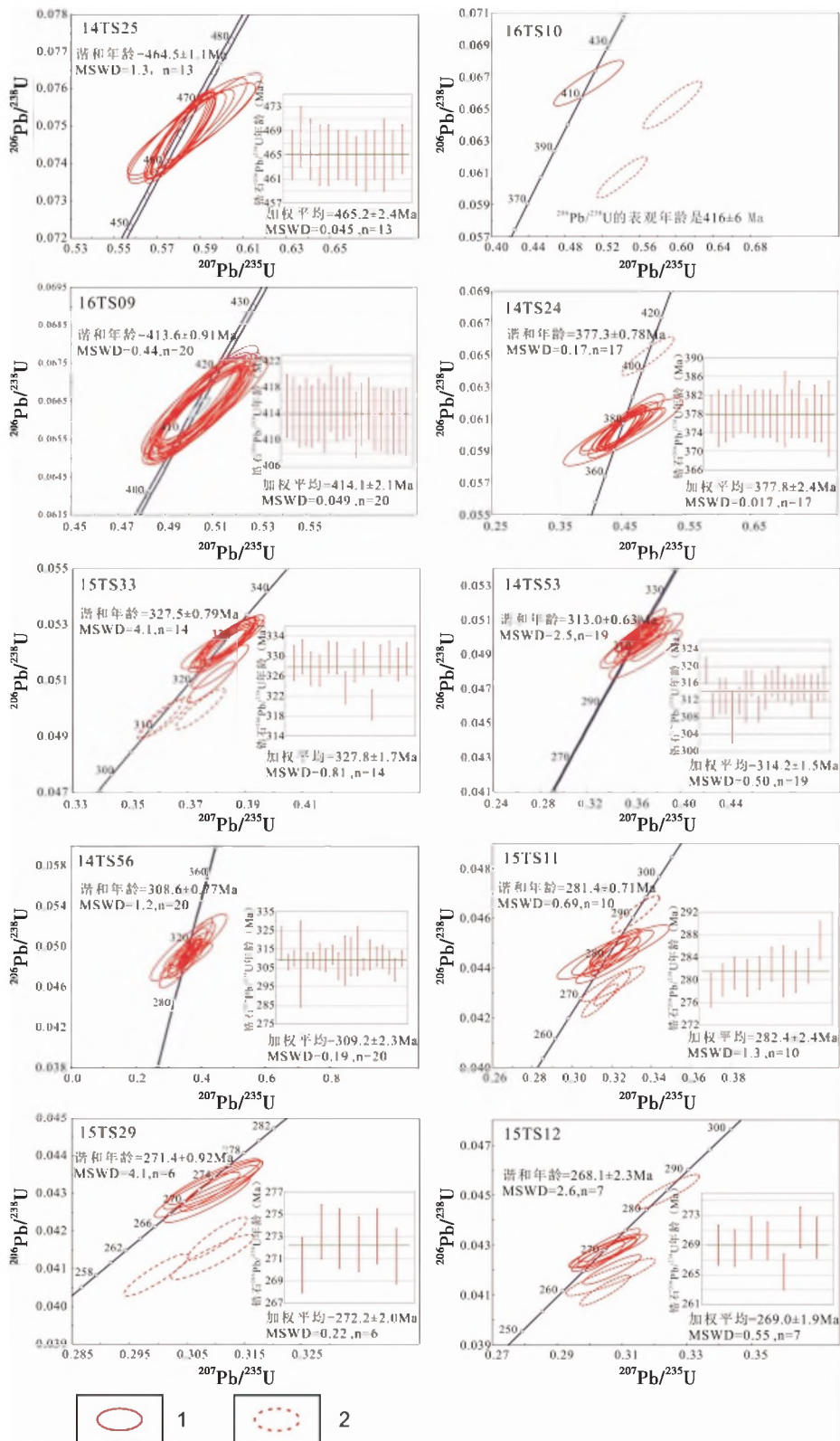
分析点	年龄(Ma)	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$		$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$		$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}$	$T_{\text{DM2}}$
		比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$				
14TS24-1-3	377	0.001 280	0.000 012 0	0.282 923	0.000 069 0	5.34	13.32	469.8	496.9
14TS24-1-9	378	0.001 768	0.000 051 0	0.282 880	0.000 110 0	3.82	11.70	538.3	583.4
14TS24-1-10	378	0.001 785	0.000 048 0	0.282 864	0.000 074 0	3.25	11.13	561.7	613.4
14TS24-1-12	379	0.001 582	0.000 036 0	0.282 740	0.000 100 0	-1.13	6.81	736.8	839.1
14TS24-1-11	377	0.003 140	0.000 120 0	0.282 805	0.000 065 0	1.17	8.68	671.7	746.1
14TS24-1-19	371	0.001 469	0.000 012 0	0.282 831	0.000 069 0	2.09	9.89	604.3	671.5
14TS25-1-1	465	0.000 830	0.000 036 0	0.282 876	0.000 053 0	3.68	13.67	530.6	550.3
14TS25-1-2	458	0.002 118	0.000 022 0	0.282 909	0.000 051 0	4.84	14.30	501.1	512.9
14TS25-1-3	468	0.000 779	0.000 055 0	0.282 907	0.000 044 0	4.77	14.85	486.1	491.6
14TS25-1-6	465	0.002 703	0.000 063 0	0.282 905	0.000 057 0	4.70	14.12	515.2	528.3
14TS25-1-7	465	0.001 051	0.000 026 0	0.282 913	0.000 060 0	4.99	14.91	481.1	485.9
14TS25-1-9	465	0.001 029	0.000 042 0	0.282 921	0.000 051 0	5.27	15.20	469.5	470.8
14TS25-1-11	464	0.004 017	0.000 096 0	0.282 891	0.000 061 0	4.21	13.20	556.4	577.9
14TS25-1-12	455	0.001 304	0.000 096 0	0.282 927	0.000 040 0	5.48	15.12	464.4	467.1
16TS9-1-2	414.8	0.001 855	0.000 044 0	0.282 880	0.000 064 0	3.82	12.45	539.6	574.5
16TS9-1-3	413.7	0.002 015	0.000 012 0	0.282 888	0.000 051 0	4.10	12.66	530.3	562.5
16TS9-1-4	414.3	0.002 113	0.000 030 0	0.282 851	0.000 080 0	2.79	11.34	585.7	632.8
16TS9-1-5	413.7	0.002 143	0.000 019 0	0.282 935	0.000 052 0	5.76	14.29	463.3	476.9
16TS9-1-6	414.7	0.002 320	0.000 041 0	0.282 936	0.000 050 0	5.80	14.30	464.1	477.5
16TS9-1-7	413.4	0.002 021	0.000 016 0	0.282 929	0.000 066 0	5.55	14.11	470.5	486.3
16TS9-1-8	416.4	0.002 270	0.000 043 0	0.282 940	0.000 120 0	5.94	14.49	457.6	468.8
16TS9-1-9	414.8	0.001 882	0.000 060 0	0.282 916	0.000 058 0	5.09	13.72	487.7	508.0
16TS9-1-10	414.9	0.002 294	0.000 054 0	0.282 871	0.000 066 0	3.50	12.01	559.3	598.4
16TS10-1-1	415.5	0.002213	0.0000052	0.282902	0.0000540	4.60	13.10	512.6	539.0

注:测试单位为“中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室”。

在采自卡拉塔克岩体的样品 14TS25 中,一共挑选了 20 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析以及 8 颗年龄比较谐和的锆石进行原位 Lu-Hf 同位素分析。20 颗锆石晶体在阴极发光图像(CL)中,颗粒发光程度较弱,少见震荡环带结构。Th/U 值为 0.236~0.801。这些锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄高度集中在 473~451 Ma。 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的谐和年龄为(464.5±1.1)Ma(MSWD=1.3),得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(465.2±2.4)Ma(MSWD=0.045)。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.000 779~0.004 017, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.282 876~0.282 927, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为

13.20~15.20,锆石颗粒的第一阶段模式年龄分布在 556~464 Ma,第二阶段模式年龄分布在 578~467 Ma,平均值为 491 Ma。

在采自大南湖岩体的样品 16TS10 中,一共挑选了 4 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析,并对唯一谐和的锆石进行了原位 Lu-Hf 同位素分析。Th/U 值为 0.377~0.679。仅有 16TS10-1 的测试结果落在了谐和线,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄为(416±6)Ma。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄计算得到的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 13.1,第一阶段模式为 513 Ma,第二阶段模式年龄为 652 Ma。

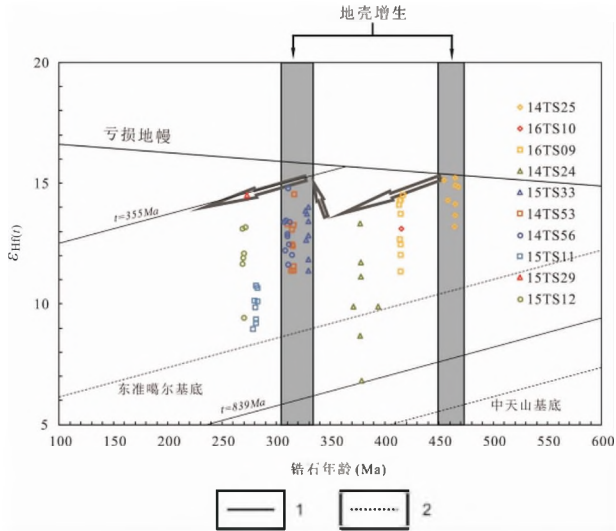


1. 谐和锆石数据; 2. 捕获锆石或发生铅丢失锆石的数据; n. 锆石数据数

图 4 大南湖样品锆石 U-Pb 谐和图以及  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均图

Fig. 4 Associated U-Pb concordia diagrams and weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  dates for samples of Dananhu





1. 地壳演化线, 839 Ma 与 355 Ma 分别是本次研究中 Hf 二阶段年龄的上下限; 2. 东准噶尔基底最年轻年龄 700 Ma (韩宝福等, 2006; 胡霭琴等, 2003) 与中天山基底最年轻年龄 900 Ma (胡霭琴等, 2006; 黄河等, 2015) (箭头代表锆石 Hf 同位素的演化趋势)

图 5 大南湖岛弧带样品锆石 Hf 同位素特征图

Fig. 5 Zircon Hf isotopic features of samples from Dananhu

在采自大南湖岩体的样品 16TS09 中, 一共挑选了 20 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析以及 9 颗年龄比较谐和的锆石进行原位 Lu-Hf 同位素分析。Th/U 值为 0.398~0.654, 绝大部分大于 0.4, 这些锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的表观年龄范围高度集中在 416.4~412.4 Ma。 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄为  $(413.6 \pm 0.91)$  Ma (MSWD = 0.44), 得到的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(414.1 \pm 2.1)$  Ma (MSWD = 0.049)。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.001 855~0.002 32,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.282 851~0.282 94, 按照每个锆石独立的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的表观年龄来计算得到的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 11.34~14.49, 第一阶段模式年龄分布在 586~458 Ma, 第二阶段模式年龄分布在 633~469 Ma, 平均值为 532 Ma。

在采自黄土坡南岩体的样品 14TS24 中, 一共挑选了 20 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析。20 颗锆石晶体在阴极发光图像 (CL) 中整体自行程度较好, 部分颗粒发光程度较强, 同时可见震荡环带结构十分明显, 且环带较窄。形态上更多地以短柱状为主, 长宽比约为 1.1~1.6。Th/U 值为 0.588~1.031, 均大于 0.4, 结合其震荡环带结构, 可以确定其成因为岩浆成因。这些锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的表观年龄高

度集中在 379~377 Ma (其中 14TS24-1、19、20 号颗粒  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表观年龄为 401 Ma、411 Ma、405 Ma)。在  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的谐和图中 (图 4), 14TS24-1 号锆石数据位置在图像中偏高, 可能是由于其本身是捕获锆石或者测试点过于接近核部导致数据偏差。19、20 号锆石应该是实验误差导致, 不体现在谐和图中。其余 17 个测试点得到的谐和年龄为  $(377.3 \pm 0.78)$  Ma (MSWD = 0.17), 得到的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(377.8 \pm 2.4)$  Ma (MSWD = 0.017)。

在采自黄山以西的样品 15TS33 中, 一共挑选了 18 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析以及 8 颗年龄比较谐和的锆石进行原位 Lu-Hf 同位素分析。Th/U 值为 0.334~0.960, 均大于 0.4,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的表观年龄主要在 330~312 Ma, 除其中 15TS33-1 号的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表观年龄为 228 Ma。谐和年龄为  $(327.5 \pm 0.79)$  Ma (MSWD = 4.4),  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(327.8 \pm 1.7)$  Ma (MSWD = 0.81)。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.001 186~0.002 536,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.282 896~0.282 977。按照每个锆石独立的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的表观年龄来计算, 得到的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  在 11.39~15.73, 第一阶段模式年龄分布在 507~404 Ma, 第二阶段模式年龄分布在 576~429 Ma, 平均值为 487 Ma。

在位于沁城以南的样品 14TS53 中, 一共挑选了 20 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析以及 9 颗年龄比较谐和的锆石进行原位 Lu-Hf 同位素分析。Th/U 值为 0.437~0.619, 均大于 0.4,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的表观年龄主要在 319~308 Ma (其中 14TS53-17 号锆石表观年龄为 292 Ma)。谐和年龄为  $(313.0 \pm 0.63)$  Ma (MSWD = 2.5),  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(314.2 \pm 1.5)$  Ma (MSWD = 0.50)。所有 Lu-Hf 测试点的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.002 935~0.004 495,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.282 919~0.283 012, 按照每个锆石独立的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的表观年龄来计算得到的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  在 11.36~14.53, 第一阶段模式年龄分布 512~373 Ma, 第二阶段模式年龄分布在 565~388 Ma, 平均值为 496 Ma。

在同位于沁城南的样品 14TS56 中, 一共挑选了 20 颗锆石进行 U-Pb 分析以及 10 颗年龄比较谐和的锆石进行原位 Lu-Hf 同位素分析。20 颗锆石晶体在阴极发光图像 (CL) 中自行程度较差, 震荡

环带结构不明显。有2个测试点的Th/U值分别为0.351(14TS56-4)和0.389(14TS56-18),其余测试点的Th/U值为0.422~1.449。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄为318~304 Ma。 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的谐和年龄为(308.6±0.77) Ma (MSWD=1.2)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(309.2±2.3) Ma (MSWD=0.19)。Lu-Hf测试点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.000 936~0.004 316, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282 916~0.283 007,按照每个锆石独立的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄来计算得到的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 在11.62~14.78,第一阶段模式年龄主要分布在480~408 Ma(除-12号测试点的第一阶段模式年龄为355 Ma),第二阶段模式年龄分布在548~444 Ma(除-12号测试点的第二阶段模式年龄为371 Ma),整体的平均值为476 Ma,不考虑12号测试点之后的平均值为487 Ma。

在采自推克曼塔什附近的样品15TS11中,一共挑选了14颗锆石进行U-Pb同位素分析以及8颗年龄比较谐和的锆石进行原位Lu-Hf同位素分析。Th/U值为0.416~0.951,均大于0.4, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄为291~273 Ma。谐和年龄为(281.4±0.71) Ma (MSWD=0.69),得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(282.4±2.4) Ma (MSWD=1.3)。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.001 231~0.005 529, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282 866~0.282 912,按照每个锆石独立的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄来计算得到的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 在8.94~10.76,第一阶段模式年龄分布在577~491 Ma,第二阶段模式年龄分布在671~571 Ma,平均值为621 Ma。

在采自土屋以西的样品15TS29中,一共挑选了9颗锆石进行U-Pb同位素分析以及1颗年龄比较谐和的锆石进行原位Lu-Hf同位素分析。9颗锆石晶体在阴极发光图像(CL)中较少见震荡环带结构。Th/U值为0.820~1.400,均大于0.4, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄为273~258 Ma。谐和年龄为(271.4±0.92) Ma (MSWD=4.1), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(272.2±2.0) Ma (MSWD=0.22)。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.009 308, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.283 060,按照锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄来计算得到的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为14.51。第一阶段模式年龄为348 Ma,第二阶段模式年龄为355 Ma。

在同样采自推克曼塔什附近的样品15TS12

中,一共挑选了10颗锆石进行U-Pb同位素分析以及6颗年龄比较谐和的锆石进行原位Lu-Hf同位素分析。10颗锆石晶体形态上更多地以短柱状为主,长宽比约为1~1.5。Th/U值为0.403~0.959,均大于0.4, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄主要在272~260 Ma(其中15TS12-6号锆石相对较低,对应 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄为292 Ma)。谐和年龄为(268.1±2.30) Ma (MSWD=2.6),这7个测试点得到的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(269.0±1.9) Ma (MSWD=0.55)。 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.000 676~0.003 167,均远远小于0.010, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.282 874~0.282 992,按照每个锆石独立的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的表观年龄来计算得到的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 在9.42~13.17,第一阶段模式年龄分布在531~388 Ma,第二阶段模式年龄分布在638~429 Ma,平均值为499 Ma。

## 4 讨论

### 4.1 古生代岩浆活动

本次研究中的锆石多数自形程度较高、发光程度较高、具有震荡环带结构,Th/U值较高且普遍大于0.4,表明其为岩浆成因,其年龄结果可以代表岩浆岩形成时间。本次研究的10个样品锆石年龄范围在468~265 Ma,说明东天山大南湖岛弧带地区的岩浆活动至少在中奥陶世已经开始,持续到了中二叠世,并在期间经历了多次岩浆活动的影响。结合前人研究(表4)可以将岛弧带内达200 Ma时间跨度的古生代岩浆活动分为4个期次,分别是中奥陶世到晚志留世465~413 Ma(分布在卡拉塔格和大南湖)、泥盆纪391~377 Ma(分布在卡拉塔格)、石炭纪327~308 Ma(分布在黄土西以及沁城南)、早一中二叠世284~269 Ma(分布在土屋西和推克曼塔什)。

大南湖-头苏泉岛弧带接受的俯冲过程开始于奥陶纪(XIAO et al., 2004; 王克卓等, 2017; 李玮等, 2016; 李锦轶等, 2006),奥陶纪-志留纪的岩浆活动都属于在俯冲过程的初期形成的。来自卡拉塔格地区的样品14TS25锆石U-Pb数据显示其形成年龄为(464.5±1.1) Ma,说明东天山地区在中奥陶世465 Ma就开始有侵入岩生成。同时,来自大南湖岩体的样品16TS09和16TS10以及来自卡拉塔格岩体的14TS25,结合东天山地区已有的岩浆岩年代学研究(龙灵利等, 2016; 龙灵利等, 2017; 毛启贵

表 4 东天山岩浆岩锆石年龄统计

Tab. 4 Zircon age statistics of magmatic rocks in eastern Tianshan mountains

数据来源	位置	岩性	年龄 (Ma)
本次研究	卡拉塔格	闪长岩	464.5±1.1
杜龙(2018)	哈尔里克	闪长岩	452±4
杜龙(2018)	哈尔里克	花岗岩	447±5
龙灵利等(2016)	卡拉塔格	闪长玢岩	442.6±5.3
杜龙(2018)	哈尔里克	闪长岩	442±3
龙灵利等(2017)	卡拉塔格	火山角砾岩	439.9±4.8
龙灵利等(2017)	卡拉塔格	次流纹岩	439±7
龙灵利等(2016)	卡拉塔格	闪长玢岩	437.1±3.8
毛启贵等(2010)	卡拉塔格	火山岩围岩	424±7
毛启贵等(2010)	卡拉塔格	酸性火山岩	416.3±5.9
本次研究	大南湖	闪长岩	416±6
本次研究	大南湖	二长花岗岩	413.6±0.91
熊文勃等(2018)	大南湖	二长花岗岩	394±21
宋彪等(2002)	大南湖	二长花岗岩	383±9
本次研究	卡拉塔格	花岗闪长岩	377.3±0.78
熊文勃等(2018)	大南湖	石英闪长岩	371.8±7
本次研究	黄山	二长花岗岩	327.5±0.79
肖兵等(2016)	土屋	石英钠长斑岩	324.9±2.4
肖兵等(2016)	土屋	石英钠长斑岩	324.5±2.1
黄伟等(2014)	哈密	花岗岩	320±1
白建科等(2018)	康古尔塔格断裂	玄武岩	316±2.3
高景刚等(2014)	博格达	石英角斑岩	314.9±1.2
白建科等(2018)	康古尔塔格断裂	玄武岩	314±3
本次研究	沁城	花岗斑岩	313±0.63
黄伟等(2014)	哈密	花岗岩	312±1
黄伟等(2014)	哈密	花岗岩	310±1
本次研究	沁城	闪长岩	308.6±0.77
黄伟等(2014)	哈密	花岗岩	289±1
李锦轶等(2006)	海豹滩	橄榄岩	284.5±2.5
王海培等(2017)	沙泉子	辉长闪长岩	282.5±1.7
本次研究	推克曼塔什	闪长岩	281.5±0.74
李锦轶等(2006)	恰特卡尔塔格	辉长岩	277±1.6
王海培等(2017)	沙泉子	闪长岩	276.3±1.4
王伟等(2019)	旱草湖	英云闪长岩	275±2.9
本次研究	土屋	二长花岗岩	271.4±0.92
李锦轶等(2006)	海豹滩	辉长岩	269.2±3.2
本次研究	推克曼塔什	二长花岗岩	268.1±2.3

等,2010;杜龙等,2018)显示,岩浆锆石的形成年龄连续、密集地分布在中奥陶世—晚志留世,说明在俯冲初期存在影响范围广泛且持续时间较长的岩浆活动期次,从中奥陶世持续到志留世(468~413 Ma),出露位置集中在岛弧带北部以及沁城断裂以北。来自黄土坡岩体的样品 14TS24 以及结合前人的研究(宋彪等,2002;熊文勃,2018)表明,在中泥盆世 391~377 Ma 期间存在一期岩浆事件期次。在石炭世中到晚期,南、北天上洋盆关闭,东天山地区进入后碰撞环境(夏祖春等,2005;李锦轶等,2006)。来自沁城南的样品 14TS53 和 14TS56 以及黄山地区样品 15TS33 的锆石数据,结合前人研究(肖兵等,2016;白建科等,2018;高景刚等,2014;黄伟等,2014)表明,在石炭世 327~308 Ma 期间存在一期岩浆事件期次,这时期的侵入岩具有高硅、高碱、高钾钙碱性以及弱过铝质的特点,对应着后碰撞的构造环境(夏祖春等,2005;李锦轶等,2006;黄伟等,2014)。东天山地区北部以卡拉麦里断裂为界,与东准噶尔地块相连,在石炭世中到晚期,南、北天上洋盆关闭,东天山地区进入后碰撞环境,同时天山与准噶尔地区、塔里木地区连接成为了统一的大陆(韩宝福等,2006)。在东准噶尔地区,后碰撞环境的深成岩浆活动发生在 330~265 Ma,主要集中在 330~310 Ma 和 305~280 Ma 2 个时间段(韩宝福等,2006),岩性主要由碱性花岗岩、钾长花岗岩、碱性辉长岩、碱性正长岩、闪长岩、英云闪长岩及花岗闪长岩等组成(李宗怀等,2004)。本次研究所得 327~308 Ma 的岩浆活动期次与东准噶尔地区基本重合,这进一步印证了石炭世 330 Ma 时,东天山地区已经和东准噶尔地区相连,开始经历同样的构造环境。康古尔塔格断裂附近的样品 15TS11、15TS12 和 15TS29 的年龄数据,结合前人研究(李锦轶等,2006;王伟等,2019;黄伟等,2014)显示,在二叠世中期 284~269 Ma 期间存在一期岩浆事件期次,这一阶段的岩浆活动主要集中在吐—哈盆地南部,康古尔塔格断裂附近,在化学特征上属准铝质和弱过铝质系列,较富钾,指示后碰撞的构造环境。这 4 期的岩浆活动整体表明,在古生代时期随着时间演化岩浆活动分布范围的南部边界在逐渐向南扩张。

#### 4.2 地壳演化

锆石 Hf 同位素分析得到的数据对岩石源区、岩石成因以及其源区演化过程有很好的指示意义

(BELOUSOVA et al., 2010; FISHER et al., 2018; 吴福元等, 2007)。尽管针对东天山古生代的地壳演化过程还缺少系统的研究工作,部分前人研究中表明(WU et al., 2000; WU et al., 2011; JAHN, 2004),东天山所属的中亚造山带处于连续地壳增生的过程。但最近, KRÖNER et al. (2014)通过对锆石年龄数据和 Nd-Hf 同位素分析认为,在造山带内地壳增生和地壳再造各自起着不同程度的作用。结合锆石 U-Pb 分析以及 Hf 同位素分析,可以为东天山的地壳演化过程提供证据。本次研究中的侵入岩分为了 4 期岩浆事件,锆石年龄分布从奥陶纪持续到二叠纪,跨度近 200 Ma,但这些锆石的 Hf 同位素显示出了相似的地球化学特征以及相近的二阶段模式年龄。这些锆石 Hf 同位素模式年龄连续地分布在 839~355 Ma(图 6),同时主要集中在 598~429 Ma。

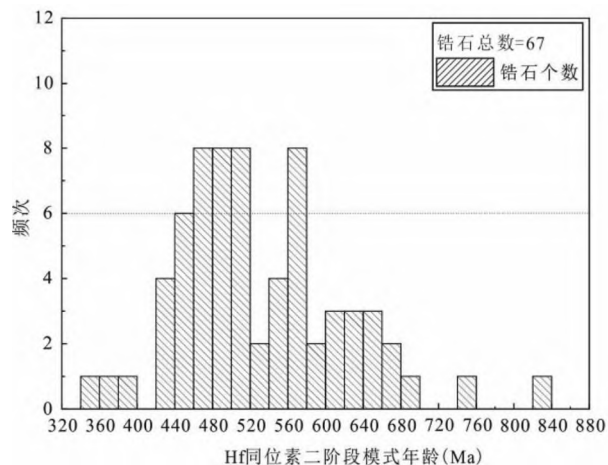


图 6 样品 Hf 同位素二阶段模式年龄直方图

Fig. 6 Histogram of  $T_{DMC}$  of Dananhu samples

中奥陶世—晚志留世的岩浆活动期次对应本次研究中来自卡拉塔格的 14TS25 以及来自大南湖的 16TS09 和 16TS10。样品 14TS25  $\epsilon_{Hf}(t)$  在 13.20~15.20。其第二阶段模式年龄分布在 578~467 Ma, 与其谐和年龄 465 Ma 非常接近。在图 5 中可见其  $\epsilon_{Hf}(t)$  的值与地幔演化线非常接近,说明其岩浆物质来源有新生地壳或者地幔物质的参与。16TS19 的  $\epsilon_{Hf}(t)$  在 11.34~14.49, Hf 同位素二阶段年龄为 633~469 Ma, 16TS10 的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值为 13.1, Hf 同位素二阶段年龄为 652 Ma。从图 5 中可见,这 2 个样品  $\epsilon_{Hf}(t)$  值都相对远离地幔演化线,同时位于



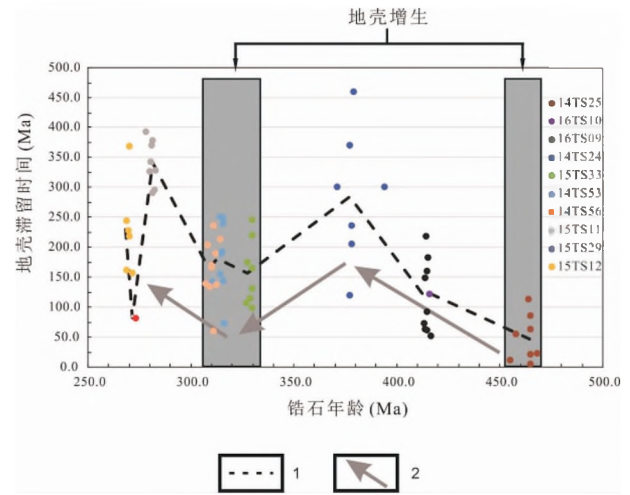
14TS25 延伸出的地壳演化线下方,可见这 2 个样品的岩浆物质来源都是老地壳的再造。同理,泥盆纪岩浆活动期次的来自卡拉塔格的 14TS24,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  在 8.68~13.32, 二阶段模式年龄分布在 839~496 Ma。在图 5 中可见,其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  依然落在 14TS25 延伸出的地壳演化线的下方,不同的是其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  相比中奥陶世一晚志留世的岩浆活动期次的样品下限更低,说明其物质来源是老地壳的再造,同时岛弧带底部存在年龄在 839 Ma 附近的老地壳。

石炭纪的岩浆活动期次对应来自黄山西的样品 15TS33 和来自沁城南的 14TS53 和 14TS56。15TS33 的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  在 11.39~15.73, 第二阶段模式年龄分布在 576~429 Ma; 14TS53 的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  在 11.36~14.53, 第二阶段模式年龄分布在 565~388 Ma; 14TS56 的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  在 11.62~14.78, 第二阶段模式年龄分布在 548~371 Ma。从图 5 中可以看出,这一期次的侵入岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  相比之前的样品又出现了一个高点,离地幔演化线较近,而明显偏离了之前的地壳演化线,说明其岩浆物质来源中又有新生地壳或者地幔物质的参与。

二叠纪的岩浆活动期次对应来自土屋西的 15TS29 以及推克曼塔什的 15TS11 和 15TS12。15TS29 的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.283 060, 接近亏损地幔中的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 14.51, 第二阶段模式年龄为 355 Ma; 15TS11 的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  在 8.94~10.76, 第二阶段模式年龄分布在 671~571 Ma; 15TS12  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  在 9.42~13.17, 第二阶段模式年龄分布在 638~429 Ma。这一期次侵入岩的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  相对较低, 远离地幔演化线, 同时处在石炭纪样品延伸出的地壳演化线的下方, 说明这一期次的岩浆物质来源是老地壳的再造。

结合锆石年龄和 Hf 同位素特征, 通过测试数据在  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$  图解(图 5)中的线性关系, 可以分析出岩浆活动是源于地壳增生还是老地壳的再造 (LAURENT et al., 2015; VERVOORT et al., 2016; 刘建辉等, 2012)。在图 5、图 7 中, 箭头清晰地指示了东天山侵入岩 Hf 同位素数据的演化规律。在 465 Ma 附近以及 330 Ma 附近,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  的值达到了一个高值且接近地幔演化线, 其余锆石年龄的 Hf 同位素数据则以这 2 个高值为起点, 跟随地壳演化线方向下降, 逐渐远离地幔演化线。结合 U-Pb 数据表明, 中奥陶世 465 Ma 附近以及中石

炭世 330 Ma 附近的锆石各自具有相近的锆石年龄和 Hf 同位素二阶段年龄, 说明在中奥陶世 465 Ma 附近以及中石炭世 330 Ma 附近存在着地壳增生事件。其余时期锆石的锆石年龄则普遍小于 Hf 同位素二阶段年龄, 同时具有相对较低的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 则对应着地壳的再造事件。在岛弧带内, 中奥陶世 465 Ma 时期正是古生代俯冲开始的时间, 也是本研究划分古生代 4 个岩浆活动期次中最早 1 期岩浆活动期次的开始; 中石炭世 330 Ma 时期则对应洋壳完全消减, 岛弧带进入碰撞环境的地质过程, 同时也是第 3 个岩浆活动期次的开始。在全球范围内, 根据最近对全球锆石年龄分布统计研究 (BELOUSOVA et al., 2010), 中奥陶世 465 Ma 以及中石炭世 330 Ma 对应全球统计下锆石年龄的 2 个频率高值, 说明这 2 期东天山内的地壳增生事件与全球岩浆活动的强烈时期同步。



1. 各样品平均值的连线; 2. 数据演化的趋势(地壳滞留时间为 Hf 二阶段模式年龄减锆石年龄)

图 7 样品锆石地壳滞留时间图

Fig. 7 Scatter diagram of crustal incubation time of Dananhu samples

本次研究中锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄分布在 839~355 Ma, 集中在 598~429 Ma,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  集中在 9.2~15.2, 部分锆石测试点的结果远离地幔演化线, 具有较老的 Hf 同位素二阶段年龄。前人针对东天山锆石 Hf 同位素研究中, 也发现了较老的 Hf 二阶段年龄。肖兵等(2015)对土屋地区的花岗闪长岩样品进行分析, 得到锆石加权平均年龄为  $(420.9 \pm 3.2)$  Ma, Hf 同位素单阶段年龄为 687~

574 Ma,二阶段年龄为 844~667 Ma。刘彬等(2016)对东天山白山钼矿床深部花岗斑岩体进行分析,得到 Hf 同位素二阶段模式年龄为 758~556 Ma;王银宏等(2014)对东天山土屋地区的英云闪长岩进行了分析,得到 Hf 同位素二阶段年龄为 938~346 Ma。黄伟等(2014)曾对哈密地区石炭—二叠纪碱性花岗岩进行 Hf 同位素分析,来自石城子地区的样品二阶段年龄为 985~681 Ma;来自沁城的样品二阶段年龄为 731~436 Ma;来自巴里坤的样品二阶段年龄为 852~411 Ma;来自伊吾下马崖的样品二阶段年龄为 798~343 Ma。以上研究都获得了较老的二阶段年龄,说明岛弧带底部可能存在年龄较老的地壳物质。结合前面对本次研究中每个样品岩浆来源的分析以及前人研究,可以说明岛弧带内侵入岩的物质来源主体是底部的老地壳物质,其年龄在新元古代—早古生代 839~355 Ma,主要集中在 598~429 Ma。另外,本次研究中存在新元古代 Hf 二阶段模式年龄,但其频率远低于早古生代的年龄频率,这可能是不同年龄的地壳物质保存能力不同导致的,而非真实的地壳增生情况(HAWKES-WORTH et al., 2009),确切答案需要更多岩浆岩的 Hf 同位素数据以及对老地壳的直接分析。中天山地区的基底主要形成时间为 2.5~0.9 Ga(胡霁琴等, 2006;黄河等, 2015)。从图 5 中可以见到,本次研究中的锆石并没有 Hf 同位素数据落在中天山基底的数据范围内,说明岛弧带奥陶纪—二叠纪的岩浆活动受到中天山物质影响的可能性并不大。而部分测试结果与准噶尔地区基底数据有重合(韩宝福

等, 2006;胡霁琴等, 2003;李亚萍等, 2007),且在石炭纪洋壳闭合后,东天山地块和东准噶尔地块相连,所以岛弧带内的岩浆活动可能接受了部分准噶尔地区物质的影响,但更确切的结果需要更多的地球科学证据来支持。

综上所述,说明岛弧带在中奥陶世 465 Ma 以及中石炭世 330 Ma 存在地壳增生事件,晚奥陶世—晚志留世,中泥盆世和中二叠世的岩浆活动则来自老地壳的再造。同时大南湖岛弧带底部存在老的地壳基底作为岩浆活动的主要物质来源,其形成时间范围为 839~355 Ma,主要集中在 598~429 Ma。

## 5 结论

通过对大南湖—头苏泉岛弧带内沁城地区、卡拉塔格地区、大南湖地区、新疆黄山地区、推克曼塔什地区以及土屋地区出露的中酸性侵入岩样品进行的岩相学、锆石 U-Pb 年代学以及 Lu-Hf 同位素分析,结合前人的研究成果,对这些岩体的岩石学特征、侵位时代、及大南湖—头苏泉岛弧带的地壳演化以及基底属性进行了深入的讨论,得出了以下认识。

(1)岛弧带内古生代侵入岩形成于 465~265 Ma(表 5),可划分为 4 个期次,分别为中奥陶世—晚志留世 465~413 Ma(分布在卡拉塔格和大南湖)、中—晚泥盆世 391~377 Ma(分布在卡拉塔格)、石炭纪 327~308 Ma(分布在黄山西以及沁城南)、早—中二叠世 284~269 Ma(分布在土屋西和推克曼塔什)。

表 5 大南湖—头苏泉岛弧带各地区出露侵入岩数据表  
Tab. 5 Data of exposed intrusive rocks by region in Dananhu arc

地理位置	样品号	岩性	经纬度	谐和年龄(Ma)	加权平均年龄(Ma)	$T_{DM2}$ (Ma)
沁城南	14TS53	花岗斑岩	42°43'15"N, 94°26'47"E	313.0±0.63	314.2±1.5	565~388
	14TS56	闪长岩	42°41'10"N, 94°34'08"E	308.6±0.77	309.2±2.3	548-371
卡拉塔格	14TS25	闪长岩	42°35'36"N, 91°55'35"E	464.5±1.1	465.2±2.4	467~578
	14TS24	花岗闪长岩	42°29'32"N, 92°00'32"E	377.3±0.78	377.8±2.4	497~839
大南湖	16TS10	闪长岩	42°28'14"N, 93°09'14"E	416±6	416±6	652
	16TS09	二长花岗岩	42°27'15"N, 93°07'36"E	413.6±0.91	414.1±2.1	469~633
黄山西	15TS33	二长花岗岩	42°15'14"N, 94°35'01"E	327.5±0.79	327.8±1.7	575~429
推克曼塔什	15TS11	闪长岩	42°05'05"N, 90°21'54"E	281.4±0.71	282.4±2.4	671~571
	15TS12	二长花岗岩	42°05'05"N, 90°21'55"E	268.1±2.30	269.0±1.9	638~429
土屋西	15TS29	二长花岗岩	42°03'51"N, 92°14'45"E	271.4±0.92	272.2±2.0	355

(2)确定岛弧带古生代在约 465 Ma 和约 330 Ma 2 个时期存在地壳增生事件,以及晚奥陶世—晚志留世、中泥盆世和中二叠世存在地壳再造事件。

(3)根据本次研究中的 Hf 同位素数据中,部分锆石存在较高的二阶段模式年龄,推断大南湖岛弧带底部存在老的地壳基底。

## 参考文献(References):

白建科,刘池阳,张少华,等. 东天山吐哈盆地南缘企鹅山群玄武岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其对北天山洋闭合时限的约束[J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 2995-3010.

BAI Jianke, LIU Chiyang, ZHANG Shaohua, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basalts from the Qieshan Group in the southern Turpan-Hami Basin, East Tianshan: Constraints on closure time of the North Tianshan Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(10): 2995-3010.

陈希节,张奎华,张关龙,等. 新疆东天山哈尔里克二叠纪莫尔塔格碱性花岗岩特征、成因及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(06): 929-946.

CHEN Xijie, ZHANG Kuihua, ZHANG Guanlong, et al. Characteristics, petrogenesis and tectonic implications of the Permian Omoertage alkaline granites in Harlik area, Xinjiang[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2016, 35(06): 929-946.

杜龙. 东天山古生代长英质侵入体岩石成因及其构造背景[D]. 北京:中国科学院大学, 2018.

DU Long. Petrogenesis and tectonic setting of Paleozoic felsic intrusions in the Eastern Tianshan[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.

高景刚,李文渊,刘建朝,等. 新疆博格达东缘色皮口地区晚石炭世裂谷火山岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(12): 3539-3552.

GAO Jinggang, LI Wenyuan, LIU Jianchao, et al. Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotopes of Late Carboniferous rift volcanic in the Sepikou region, eastern Bogda, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(12): 3539-3552.

顾连兴,张遵忠,吴昌志,等. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识[J]. 岩石学报, 2006, 22(05): 1103-1120.

GU Lianxing, ZHANG Zunzhong, WU Changzhi, et al. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(05):

1103-1120.

韩宝福,季建清,宋彪,等. 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[J]. 岩石学报, 2006, 22(05): 1077-1086.

HAN Baofu, JI Jianqing, SONG Biao, et al. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(05): 1077-1086.

韩春明,肖文交,万博,等. 东天山晚古生代-中生代构造演化 and 内生金属矿床成矿系列[J]. 岩石学报, 2018, 34(07): 1914-1932.

HAN Chunming, XIAO Wenjiao, WAN Bo, et al. Late Paleozoic-Mesozoic endogenetic metallogenic series and geodynamic evolution in the East Tianshan Mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(07): 1914-1932.

侯可军,李延河,邹天人,等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2595-2604.

HOU Kejun, LI Yanhe, ZOU Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2595-2604.

胡霁琴,韦刚健,邓文峰,等. 天山东段 1.4 Ga 花岗闪长质片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地球化学, 2006, 35(04): 333-345.

HU Aiqin, WEI Gangjian, DENG Wenfeng, et al. 1.4 Ga SHRIMP U-Pb age for zircons of granodiorite and its geological significance from the eastern segment of the Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. Geochimica, 2006, 35(04): 333-345.

胡霁琴,韦刚健. 关于准噶尔盆地基底时代问题的讨论——据同位素年代学研究结果[J]. 新疆地质, 2003, 21(04): 398-406.

HU Aiqin, WEI Gangjian. A review of ages of basement rocks from junggar basin in Xinjiang, China-based on studies of geochronology[J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(04): 398-406.

胡圣虹,胡兆初,刘勇胜,等. 单个流体包裹体元素化学组成分析新技术——激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 434-440.

TAO Shenghong, HU Zhaochu, LIU Shengyong, et al. New techniques of major and minor elemental analysis in individual fluid inclusion-laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 434-440.

黄河,王涛,秦切,等. 中天山巴仑台地区花岗质岩石的 Hf 同位素研究:对构造演化及大陆生长的约束[J]. 地质学报, 2015, 89(12): 2286-2313.

- HUANG He, WANG Tao, QIn Qie, et al. Zircon Hf Isotopic Characteristics of Granitoids from the Baluntai Region, Central Tianshan; Implications for Tectonic Evolution and Continental Growth[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2286-2313.
- 黄伟. 东天山哈密地区石炭—二叠纪碱性花岗岩年代学、地球化学及成因[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- HUANG Wei. Geochronology, Geochemistry and Origin of Carboniferous-Permian Alkali Granites in Eastern Tianshan, Hami, NW China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- 李锦轶, 宋彪, 王克卓, 等. 东天山吐哈盆地南缘二叠纪幔源岩浆杂岩: 中亚地区陆壳垂向生长的地质记录[J]. *地球学报*, 2006, 27(05): 424-446.
- LI Jinyi, SONG Biao, WANG Kezhao, et al. Permian Mafic-Ultramafic Complexes on the Southern Margin of the Tu-Ha Basin, East Tianshan Mountains; Geological Records of Vertical Crustal Growth in Central Asia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2006, 27(05): 424-446.
- 李锦轶. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. *地质论评*, 2004, 50(03): 304-322.
- LI Jinyi. Late Neoproterozoic and Paleozoic Tectonic Framework and Evolution of Eastern Xinjiang, NW China[J]. *Geological Review*, 2004, 50(03): 304-322.
- 李文明, 任秉琛, 杨兴科, 等. 东天山中酸性侵入岩浆作用及其地球动力学意义[J]. *西北地质*, 2002, 35(04): 41-64.
- LI Wenming, REN Bingchen, YANG Xingke, et al. The intermediate-acid intrusive magmatism and its geodynamic significance in Eastern Tianshan region[J]. *Northwestern Geology*, 2002, 35(04): 41-64.
- 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. *地质调查与研究*, 2009, 32(03): 3-16.
- LI Changmin. A Review on the Minerageny and Situ Micro-analytical Dating Techniques of Zircons[J]. *Geological Survey and Research*, 2009, 32(03): 3-16.
- 李宗怀, 韩宝福, 李辛子, 等. 新疆准噶尔地区花岗岩中微粒闪长质包体特征及后碰撞花岗岩浆起源和演化[J]. *岩石矿物学杂志*, 2004, 23(03): 214-226.
- LI Zonghuai, HAN Baofu, LI Xinzi, et al. Microgranular dioritic enclaves in Junggar granites and their implications for the origin and evolution of post-collisional granitic magmatism in North Xinjiang[J]. *Acta Petrologica ET Mineralogica*, 2004, 23(03): 214-226.
- 刘彬, 王学求. 东天山白山斑岩钼矿床深部斑岩体锆石 SIMS U-Pb 定年、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2016, 23(05): 291-300.
- LIU Bin, WANG Xueqiu. SIMS U-Pb dating and Hf isotope of zircons from the deep granite porphyry in Baishan Mo deposit, eastern Tianshan, Northwest China, and their geological significance [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(05): 291-300.
- 龙灵利, 王京彬, 王玉往, 等. 东天山卡拉塔格矿集区赋矿火山岩地层时代探讨——SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄证据[J]. *矿产勘查*, 2016, 7(01): 31-37.
- LONG Lingli, WANG Jingshan, WANG Yuwang, et al. Discussion on the age of ore-host volcanic strata in the Kalatage ore concentration area, eastern Tianshan; Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Mineral Exploration*, 2016, 7(01): 31-37.
- 龙灵利, 王京彬, 王玉往, 等. 东天山卡拉塔格铜多金属矿集区黄铁矿化(次)流纹岩年代学、地球化学特征及其对成矿的潜在意义[J]. *岩石学报*, 2017, 33(02): 367-384.
- LONG Lingli, WANG Jingshan, WANG Yuwang, et al. Zircon U-Pb geochronological, geochemical characteristics and potential mineralization significance of the rhyolite in Kalatage copper polymetallic ore cluster area, eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(02): 367-384.
- 毛启贵, 方同辉, 王京彬, 等. 东天山卡拉塔格早古生代红海块状硫化物矿床精确定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(10): 3017-3026.
- MAO Qigui, FANG Tonghui, WANG Jingbin, et al. Geochronology studies of the Early Paleozoic Honghai massive sulfide deposits and its geological significance in Kalatage area, eastern Tianshan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10): 3017-3026.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 等. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. *新疆地质*, 2002, 20(04): 302-308.
- QIN Kezhang, FANG Tonghui, WANG Shulai, et al. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in Eastern Tianshan mountains, NW-China[J]. *Xinjiang Geology*, 2002, 20(04): 302-308.
- 宋彪, 李锦轶, 李文铅, 等. 吐哈盆地南缘克孜尔卡拉萨依和大南湖花岗质岩基锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *新疆地质*, 2002, (04): 342-345.
- SONG Biao, LI Jinyi, LI Wenqian, et al. Shrimp dating of zircons from dananhu and kezirkalasayi granitoid batholith in southern margin of tuha basin and their geological implication[J]. *Xinjiang Geology*, 2002, (04): 342-345.
- 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. *中国地质*, 2006, (03): 461-469.
- WANG Jingbin, WANG Yuwang, HE Zhijun. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China[J]. *Geology in China*, 2006, (03): 461-469.
- 王伟, 孟勇, 王凯, 等. 新疆东天山旱草湖环状岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. *地质通报*, 2019, 38

(05):777-789.

WANG Wei, MENG Yong, WANG Kai, et al. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics and petrogenesis of ringed pluton in the Hancaohu area, eastern Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(05):777-789.

王银宏, 薛春纪, 刘家军, 等. 新疆东天山土屋斑岩铜矿床地球化学、年代学、Lu-Hf 同位素及其地质意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(11):3383-3399.

WANG Yinhong, XUE Chunjie, LIU Jiajun, et al. Geochemistry, geochronology, Hf isotope, and geological significance of the Tuwu porphyry copper deposit in eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11):3383-3399.

吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(02):185-220.

WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(02):185-220.

夏祖春, 徐学义, 夏林圻, 等. 天山石炭-二叠纪后碰撞花岗岩质岩石地球化学研究[J]. 西北地质, 2005, 38(01):1-14.

XIA Zuchun, XU Xueyi, XIA Linqi, et al. Geochemistry of the Carboniferous-Permian post-collisional granitic rocks from Tianshan[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(01):1-14.

肖兵, 陈华勇, 王云峰, 等. 东天山土屋-延东铜矿矿区晚志留世岩体的发现及构造意义[J]. 地学前缘, 2015, 22(06):251-266.

XIAO Bing, CHEN Huayong, WANG Yunfeng, et al. Discovery of the Late Silurian granodiorite and its tectonic significance in the Tuwu-Yandong porphyry copper deposits, Dananhu-Tousuquan island arc, Eastern Tianshan[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(06):251-266.

肖文交, 韩春明, 袁超, 等. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用:对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2006, 22(05):1062-1076.

XIAO Wenjiao, HAN Chunming, YUAN Chao, et al. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of Northern Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleasian Domain[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(05):1062-1076.

熊文勃. 新疆哈密大南湖一带岩浆岩地球化学特征及构造环境分析[D]. 兰州:兰州大学, 2018.

XIONG Wenbo. Geochemical Characteristics and Tectonic Environment of Magmatic Rocks in the Area of Hami Dananhu of Xinjiang[D]. Lanzhou: Lanzhou Universi-

ty, 2018.

徐学义, 马中平, 夏祖春, 等. 天山石炭-二叠纪后碰撞花岗岩的 Nd、Sr、Pb 同位素源区示踪[J]. 西北地质, 2005, 38(02):1-18.

XU Xueyi, MA Zhongping, XIA Zuchun, et al. Discussion of the sources and characteristics on Sr、Nd、Pb isotopes of the Carboniferous to Permian post-collision granites from Tianshan[J]. Northwestern Geology, 2005, 38(02):1-18.

周济元, 崔炳芳, 肖惠良, 等. 新疆康古尔-黄山对接碰撞带的存在、成矿模式及成矿预测[J]. 火山地质与矿产, 2001, (04):252-263.

ZHOU Jiyuan, CUI Biangfang, XIAO Huiliang, et al. Kangguertag-Huangshan collision zone of bilateral subduction and its metallogenic model and prognosis in Xingjiang, China[J]. Resources Survey and Environment, 2001, (04):252-263.

AMELIN Y, LEE D C, HALLIDAY A N et al. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. Nature, 1999, 399(6733):1497-1503.

BELOUSOVA E A, KOSTISYN Y A, GRIFFIN W L et al. The growth of the continental crust: Constraints from zircon Hf-isotope data[J]. Lithos, 2010, 119(3-4):457-466.

BLICHERT-TOFT J, CHAUVEL C, ALBARÈDE F. Separation of Hf and Lu for high-precision isotope analysis of rock samples by magnetic sector-multiple collector ICP-MS[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1997, 127(3):248-260.

CHARVET J, SHU LS, LAURENT-CHARVET S. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): welding of the Tarim and Junggar plates[J]. EPISODES, 2007, 30(3):162-186.

CHEN Bin, JAHN B M. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications[J]. Geological Magazine, 2002, 139(1):1-13.

CHUNMING Han. Late Paleozoic Metallogensis and Evolution of the East Tianshan Orogenic Belt(NW China, Central Asia Orogenic Belt)[J]. Geology of Ore Deposits, 2014, 56(6):493-512.

COLEMAN R G. Continental growth of northwest China [J]. Tectonics, 1989, 8(3).

DOBRETISOV N L, BERZIN N A, BUSLOV M M. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean[J]. International Geology Review, 1995, 37(4):335-360.

ELLISON A J G, Navrotsky A. Enthalpy of Formation of Zircon[J]. Journal of the American Ceramic Society,

- 1992, 75(6):1430-1433.
- FISHER C M, VERVOORT J D, HANCHAR J M. Guidelines for reporting zircon Hf isotopic data by LA-MC-ICPMS and potential pitfalls in the interpretation of these data[J]. *Chemical Geology*, 2014, 363:125-133.
- GASCHNIG, RICHARD M, Vervoort, et al. Probing for Proterozoic and Archean crust in the northern U. S. Cordillera with inherited zircon from the Idaho batholith [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 125 (1-2):73-88.
- GERDES A, ZEH A. Combined U-Pb and Hf isotope LA-(MC-)ICP-MS analyses of detrital zircons; Comparison with SHRIMP and new constraints for the provenance and age of an Armorican metasediment in Central Germany[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 249(1-2):0-61.
- GRIFFIN W L, BELOUSOVA E A, SHEE S R, et al. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton; U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 2004, 131(3-4):0-282.
- HAWKESWORTH C, CAWOOD P, KEMP T, et al. A Matter of Preservation[J]. *Science*, 2009, 323(5910):49-50.
- JAHN B M. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. *Geological Society*, 2004, 226(1):73-100.
- KEMP A, HAWKESWORTH C J, PATERSON B A, et al. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon[J]. *Nature*, 2006, 439:580-583.
- KRÖNER A, KOVACH V, BELOUSOVA E, et al. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1):103-125.
- LAURENT O, ZEH A. A linear Hf isotope-age array despite different granitoid sources and complex Archean geodynamics; Example from the Pietersburg block (South Africa) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 43:326-338.
- PIETRANIK A, SLODCZYK E, HAWKESWORTH C J, et al. Heterogeneous Zircon Cargo in Voluminous Late Paleozoic Rhyolites; Hf, O Isotope and Zr/Hf Records of Plutonic to Volcanic Magma Evolution[J]. *Journal of Petrology*, 2013, 54(8):1483-1501.
- QIN KZ, SUN S, LI JL, et al. Paleozoic Epithermal Au and Porphyry Cu Deposits in North Xinjiang, China; Epochs, Features, Tectonic Linkage and Exploration Significance [J]. *Resource Geology*, 2002, 52 (4):291-300.
- VERVOORT J D, KEMP A. Clarifying the zircon Hf isotope record of crust-mantle evolution[J]. *Chemical Geology*, 2016, 425:65-75.
- WANG Yunfeng, CHEN Huayong, HAN Jinsheng, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Dananhu-Tousuquan island arc belt, Eastern Tianshan; Constraints from the magmatism of the Yuhai porphyry Cu deposit, Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 153:282-306.
- WILDE, SIMON A, Valley, JOHN W, Peck, William H, et al. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago [J]. *Nature*, 2001, 409(6817):175-178.
- WINDLEY B F, ALEXEIEV D, XIAO W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(1):31-47.
- WINDLEY B F, ALLEN M B, ZHANG C, et al. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia[J]. *Geology*, 1990, 18 (2):128.
- WU F Y, JAHN B M, WILDE S, et al. Phanerozoic crustal growth; U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China [J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1):89-113.
- WU F Y, SUN D Y, GE W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1):1-30.
- XIAO Wenjiao, HAN Chunming, LIU Wei, et al. How many sutures in the southern Central Asian Orogenic Belt; Insights from East Xinjiang-West Gansu (NW China)? [J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5 (04):525-536.
- XIAO Wenjiao, HAN Chunming, YUAN Chao, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China; Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32:102-117
- XIAO Wenjiao, WINDLEY B, BADARCH G, et al. Paleozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai; Implications for the growth of central Asia [J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161(3):339-342.
- ZEH A, GERDES A, KLEMD R, et al. Archean to Proterozoic Crustal Evolution in the Central Zone of the Limpopo Belt (South Africa-Botswana); Constraints from Combined U-Pb and Lu-Hf Isotope Analyses of Zircon[J]. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 2007, 45(5):651.