

靳松, 张兆祎, 荣桂林, 等. 新疆西准噶尔玉什喀腊岩体的地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素: 对古亚洲洋闭合的制约[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 494-508.

Jin Song, Zhang Zhaoyi, Rong Guilin, et al. Geochemical characteristics, zircon U-Pb age, and Hf isotopes of Yushenkala pluton in western Junggar, Xinjiang: constraint on the closure of Paleo-Asian Ocean[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 494-508(in Chinese with English abstract).

新疆西准噶尔玉什喀腊岩体的地球化学特征、 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素: 对古亚洲洋闭合的制约

靳 松^{1,2} 张兆祎² 荣桂林² 刘新宇² 李跃辉² 张瀚文³ 毕 立²

(1. 中国地质大学地球科学学院, 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 河北省地质调查院, 河北 石家庄 050081; 3. 河北省地矿局石家庄综合地质大队, 河北 石家庄 050085)

摘要: 玉什喀腊岩体位于新疆西准噶尔北部, 西伯利亚板块与准噶尔板块交界的板块缝合带中, 岩石类型由辉长岩、角闪辉长岩、闪长岩和石英闪长岩组成, 它们侵入于中泥盆统蕴都喀拉组中。根据 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果, 角闪辉长岩的年龄为 (364 ± 1) Ma, 代表了该岩体的形成年龄。锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 4.3~11.5, 加权平均值为 (9.0 ± 1.2) , 显示其原岩来源于地幔物质, 其一阶段 Hf 模式年龄 T_{DM1} 为 529~827 Ma (平均值为 (629 ± 95) Ma), 指示其原岩为寒武-早寒武基底。根据野外地质关系和地球化学特征推断玉什喀腊岩体形成于岛弧环境或活动陆缘环境, 在西准噶尔西北部地区, 于晚泥盆世发育岛弧岩浆作用, 洋陆俯冲事件已基本结束, 指示古亚洲洋闭合时间不早于 364 Ma。

关键词: 西准噶尔; 玉什喀腊岩体; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素

中图分类号: P588.12 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)03-0494-15

Geochemical characteristics, zircon U-Pb age, and Hf isotopes of Yushenkala pluton in western Junggar, Xinjiang: Constraint on the closure of Paleo-Asian Ocean

JIN Song^{1,2}, ZHANG Zhao-yi², RONG Gui-lin², LIU Xin-yu², LI Yue-hui²,
ZHANG Han-wen³, BI Li²

(1. Faculty of Earth Science, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Hebei Institute of Geological Survey, Shijiazhuang 050081, Hebei, China;

3. Shijiazhuang Geological Party, Shijiazhuang 050085, Hebei, China)

Abstract: The Yushenkala pluton is located in the northern part of west Junggar Basin of Xinjiang and lies along the suture zone

收稿日期: 2014-10-13; 改回日期: 2015-01-06

基金项目: 教育部科技项目博士点基金“水岩作用下多裂隙岩体(岩墙群)成分-微结构-强度耦合机制研究”(20130145120016)、中央高校基本科研业务费专项资金优秀青年基金“鄂西黄陵地区区域性破裂的岩石学研究”(CUGL120280)和新疆国土资源厅地质调查项目(XJQDZ2008-01和XJQDZ2008-03)联合资助。

作者简介: 靳松, 男, 1982年生, 博士, 工程师, 主要从事岩石地球化学和区域地质矿产调查的研究; E-mail: js521@163.com。

通讯作者: 张兆祎, 男, 1969年生, 高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查的研究; E-mail: zzy.hbddy@qq.com。

between Siberia plate and Junggar plate. Petrologically, the pluton consists of gabbro, hornblende gabbro, diorite and quartz diorite which intruded in the middle Devonian Yudoukala Group. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the age of the hornblende gabbro is 364 ± 1 Ma, which represents the formation age of the pluton. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the zircon are in the range of 4.3–11.5, with a weighted average of 9.0 ± 1.2 , suggesting that its original rock was derived from mantle materials. The one-stage Hf model ages (TDM1) are 529–827 Ma (629 ± 95 Ma on average), indicating an original rock of Cambrian – Precambrian basement. Based on field geological and geochemical characteristics, the authors infer that the pluton formed in an island-arc environment or active epicontinental environment. In the late Devonian, the arc magmatism was well developed, and the ocean-continent subduction event basically came to an end in the northwestern part of western Junggar. These data indicate that the closing time of Paleo Asian ocean was not earlier than 364 Ma.

Key words: West Junggar; Yushenkala pluton; LA-ICP-MS zircon U-Pb; zircon Hf isotope

About the first author: JIN Song, male, born in 1982, doctor, engineer, majors in geochemistry, engages in research on rock geochemistry and regional geology; E-mail: js521@163.com.

新疆北部地区(简称北疆,即北纬 40° 以北地区)包括天山—准噶尔—阿尔泰在内,是巨型中亚造山带的一部分,目前地质学界基本上普遍认为新疆北部及邻区晚古生代地壳形成演化可以划分为碰撞前、碰撞和后碰撞及板内环境等构造阶段^[1–13]。由于其复杂的造山和演化过程,已成为国内外研究的热点地区之一^[14–21]。额尔齐斯构造带是西伯利亚板块和哈萨克斯坦—准噶尔板块之间的缝合线构造。构造带总体走向 310° , 向东延入蒙古,向西延入哈萨克斯坦。前人对额尔齐斯构造带以北大量花岗岩基出露地区(阿尔泰花岗岩带)、西准噶尔中西部地区(达尔布特构造带)进行了大量的研究报告,而对于额尔齐斯构造带以南的准噶尔盆地北缘及周边地区的研究相对较少。

研究发现,在古生代,西伯利亚板块与哈萨克斯坦—准噶尔板块之间存在一个古亚洲洋^[22–23]。晚古生代早期,古亚洲洋洋壳北向俯冲至西伯利亚板块之下,形成了一个古岛弧系统^[23,24,27]。然而西伯利亚、哈萨克斯坦—准噶尔、塔里木三大板块以及伊犁等微板块何时完成了最后的拼合?古亚洲洋的闭合时限?古亚洲洋的构造背景,俯冲时限?沿缝合带分布的侵入岩与洋盆演化的关系?对于主碰撞期/俯冲的岩浆活动是否存在,构造属性,地球动力学过程还是空白。因此,开展该区域有关岩浆作用的研究有助于对以上科学问题提出依据。玉什喀腊岩体位于额尔齐斯构造带以南,准噶尔北缘,可能详细记录着该区域岩浆事件与构造演化的信息。本文通过对西准噶尔玉什喀腊一带侵入岩地球化学特征、锆石的 LA-ICP-MS 法 U-Pb 定年和 Hf 同位素研究,不仅发现了其中前寒武纪—寒武纪年龄信息,

还得到了精确的同位素年龄,对于研究北疆地区构造演化、古亚洲洋闭合的时限具有重要的意义。

1 地质背景

按照“新疆板块构造单元划分”原则,该研究区属于:阿尔泰陆缘活动带(Ⅱ级)—卡尔巴—哈巴河晚古生代弧前盆地(Ⅲ级)—科克森套中泥盆世弧前盆地(Ⅳ级)。沿额尔齐斯河以南的科克森套及玉什喀腊套两侧,侵入岩发育,根据新疆区域地质调查大队十分队于 1982 年完成的 1:20 万布尔津幅、吉木乃幅区调成果,把该侵入体划分为华力西早期杂岩体。侵入体出露于西准噶尔北部边缘,面积较小,约 2 km^2 ,位于西伯利亚板块与准噶尔板块交界的板块缝合带中或附近。岩体呈岩枝状产出,顺断层侵入中泥盆统蕴都喀拉组中,其围岩岩性为变质砂岩和黑云斜长片麻岩等。根据侵入岩的矿物组成及结构、构造特征等差异,进一步划分为 2 种岩类的侵入体;根据侵入体之间接触关系由老到新为中细粒辉长岩、细粒闪长岩,二者间界线清晰,呈脉动接触关系。在岩体东侧的构造带内发育一条宽 10~15 m 英安岩脉,具绿泥石化、碳酸盐化蚀变。该侵入体在卫片影像上呈浅灰红色,呈北西向的脉状体,侵入于蕴都喀拉组中,无条带和线纹特征。

2 岩相学特征

2.1 中细粒辉长岩

该辉长岩体为一复式岩体,可进一步划分出中细粒辉长岩和中细粒角闪辉长岩 2 种岩石类型。

(1)中细粒辉长岩:岩石风化面呈浅灰色,新鲜面呈灰色,具辉长结构,块状构造。岩石主要由斜长石、

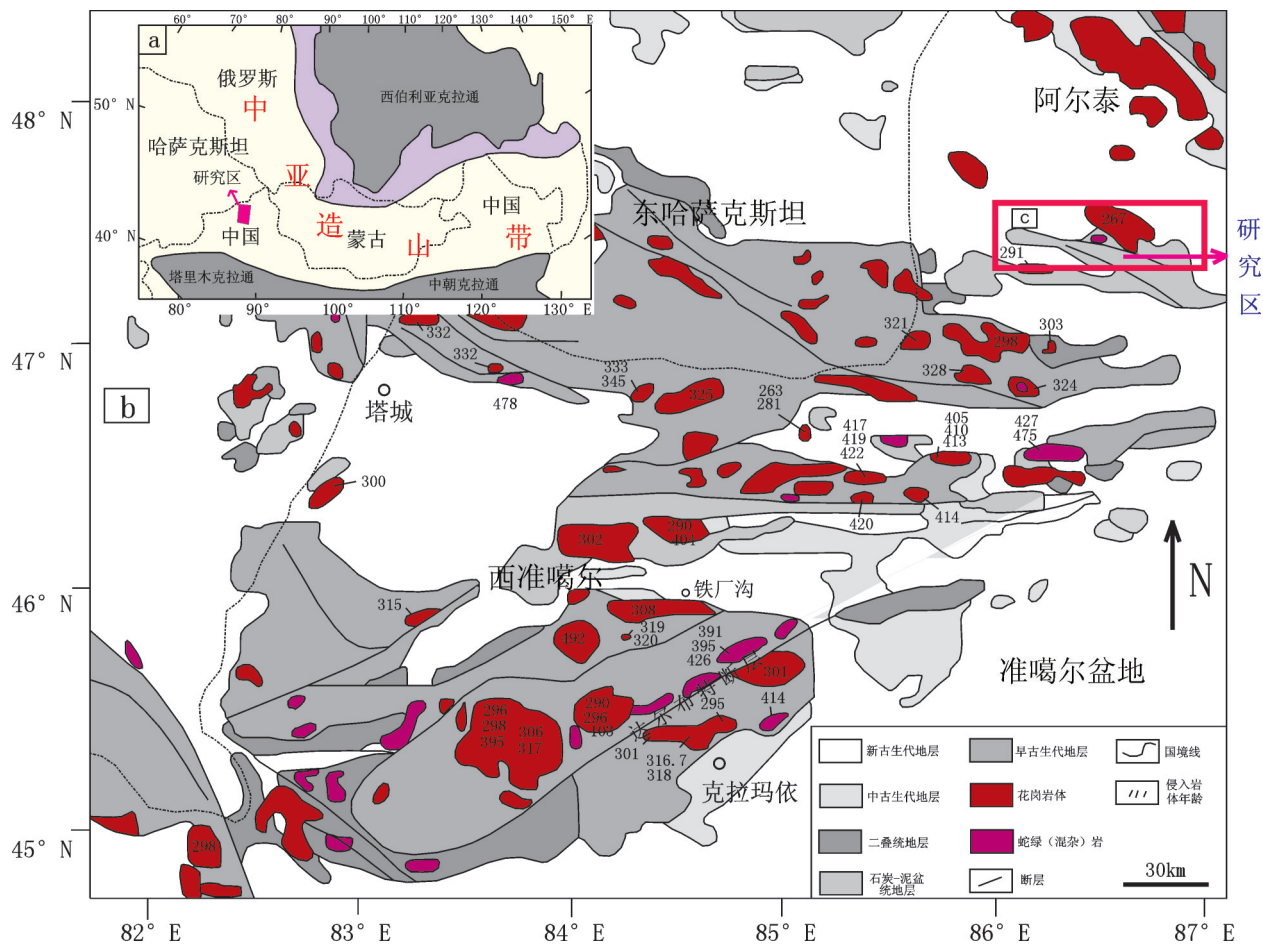


图1 研究区地质背景图

a—中亚造山带及研究区位置图;b—西准噶尔地区岩体分布示意图^[12];c—玉什喀拉岩体地质简图(据①修改)

Fig.1 Geological map of the study area

a—Location of Central Asian orogenic belt and the study area; b—Distribution of granitoids in the west Junggar (modified the literature^[12]); c—Simplified geological map of Yushenkala pluton^①

透辉石、异剥辉石构成。斜长石呈半自形板状,双晶发育,粒径0.5~2 mm, An 约 56, 属 拉 长 石, 含 量 62% 左右,少数绢云母化;透辉石,辉石式节理完全,粒径0.8~1.2 mm,含量8%左右;异剥辉石,一组细而密的节理完全,粒径0.8~3.2 mm,含量30%左右(图2-A)。

(2)中细粒角闪辉长岩:岩石风化面呈灰色,新鲜面呈深灰色,具辉长结构,块状构造。岩石主要由斜长石、普通角闪石、普通辉石组成。斜长石呈半自形板状,双晶发育,粒径0.16 mm×0.2 mm~0.4 mm×0.6 mm, An 约 56, 属 拉 长 石, 含 量 45% 左右;普通角闪石,柱状,粒径0.4~1.2 mm,多色性显著,闪石石完全解理,部分内有斜长石嵌晶,含量约15%;普通辉石多被阳起石集合体交代,残留形态,粒径

0.3~0.4 mm,含量约40%;磁铁矿少量(图2-B)。

2.2 细粒闪长岩

闪长岩可进一步划分出细粒石英闪长岩和细粒闪长岩2种岩石类型。

(1)细粒石英闪长岩:岩石风化面呈浅灰色,新鲜面呈灰色,具半自形细粒结构,微流动构造。岩石主要由斜长石、石英、黑云母构成。斜长石呈半自形板状,粒度0.3~0.4 mm,沿长轴大致平行定向排列,含量70%左右;石英,它形粒状,粒径0.08~0.16 mm,表面干净,波状消光,含量约5%;黑云母半自形叶片状,粒径0.2~0.4 mm,多绿泥石化,少部分退变为白云母,析出钛质,含量约25%。

(2)细粒闪长岩:岩石风化面呈深灰色,新鲜面

①据新疆地质局区域地质调查大队十分队.1:20万布尔津、吉木乃幅区域地质调查报告.1982.

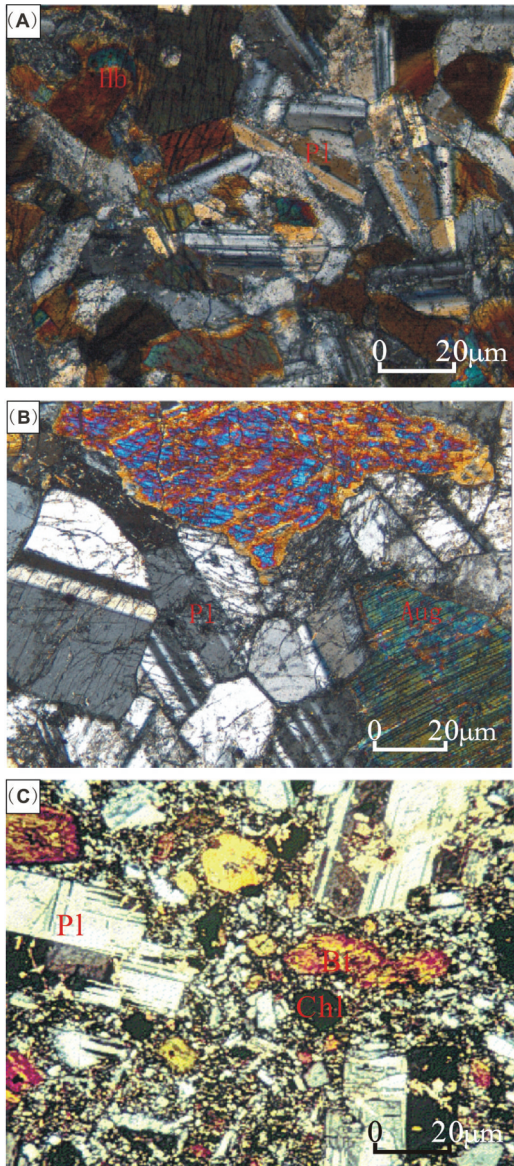


图2 显微照片

A—角闪辉长岩:岩石由斜长石(Pl)、普通角闪石(Hb)和普通辉石等构成,相互共结连生在一起,斜长石聚片双晶发育,辉石已被阳起石取代(正交偏光);B—辉长岩:岩石主要由普通辉石(Aug)和斜长石(Pl)两种矿物构成,二者共结连生在一起,具半自形粒状—板状结构,长石聚片双晶发育(正交偏光);C—闪长岩:岩石主要由斜长石(Pl)和被交代的黑云母(Bt)组成,斜长石呈半自形细板状结构,双晶可见;黑云母已被绿泥石(Chl)集合体取代,分布于斜长石间(Pl)(正交偏光)

Fig.2 Microscopic photographs

A— Hornblende gabbro: the rock consists of plagioclase (Pl), hornblende and augite (Hb), and they coexist together. Plagioclase has fine polysynthetic twin. Most augite has been replaced by actinolite, crossed nicols; B— Gabbro: the rock consists of augite and plagioclase (Aug), and they coexist together (Pl). The structure of plagioclase is subhedral granular-clintheriform. Plagioclase also has a fine polysynthetic twin, crossed nicols; C— Diorite: the rock consists of plagioclase (Pl) and metasomatic biotite (Bt). The structure of plagioclase is subhedral granular-clintheriform. Plagioclase also has a fine polysynthetic twin. Biotite is replaced by chlorite aggregates (chl) and distributed between plagioclase, crossed nicols

呈灰—灰白色,具细粒半自形细粒状结构,块状构造。岩石主要由斜长石和暗色矿物构成。斜长石呈半自形细板状,双晶可见,粒度 $0.2\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}\sim 0.4\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$,具绢云母化、轻微泥化,含量85%左右;暗色矿物约15%,已被绿泥石集合体取代,残留长柱状形态,粒径 $0.4\sim 1.2\text{ mm}$,分布于斜长石间。岩石受应力作用脆性破碎,不规则裂隙发育,宽 $0.4\sim 0.1\text{ mm}$,内分布绿泥石、石英、葡萄石(图2-C)。

3 分析方法

全岩主量元素在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,采用可见分光光度计和原子吸收分光光度计测定,分析精度优于5%。微量元素在河北省区域地质矿产调查研究所采用等离子质谱仪(ICP-MS)测定,分析精度优于5%。

锆石 U-Pb 定年在国土资源部天津地质矿产研究所利用 LA-ICP-MS 完成。所用等离子体质谱仪为 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune, 采用 193 nm 激光器对锆石进行剥蚀,斑束直径为 $35\ \mu\text{m}$, 采用 He 作为剥蚀物质的载气,锆石 TEMORA 作为年龄外标,元素含量用 NIST612 作为外标标定。锆石测定点的 Pb 同位素比值、U-Pb 表面年龄和 U-Th-Pb 含量采用 ICPMSDataCal 程序和 Isoplot 程序进行数据处理,采用 ^{208}Pb 校正法对普通铅进行校正^[28]。

锆石原位 Hf 同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)和 193nm 激光取样系统上进行,分析时激光束直径为 $63\ \mu\text{m}$,激光剥蚀时间约 26 s。测定时用锆石国际标样 91500 作外标,分析中所用的激光脉冲速率为 6 Hz,激光束脉冲能量为 100 mJ。仪器的运行条件及详细的分析过程可参见 Wu et al.(2006)^[29]。本次实验测定过程中,91500 的测定结果是 0.28325 ± 6 ,该值与目前用溶液法获得的值在误差范围内一致^[30-31],亏损地幔 Hf 模式年龄(TDM)计算采用现今亏损地幔值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ 。

4 分析结果

4.1 主量元素特征

辉长岩类: SiO_2 含量为 52.17%~53.28%, TAS 图

解落入辉长岩-闪长岩区域,类型属中基性岩类(图3)。里特曼指数(σ)为0.77~1.20,碱度率(AR)为1.23~1.28,在 SiO_2-K_2O 图解中落入钙碱性系列岩区与低钾(拉斑)系列岩区的交界区域(图4),在 $AR-SiO_2$ 图解中,所有样品落入钙碱性岩区(图5)。固结指数(SI 为24.13~24.32)较小,分异指数(DI 为33.29~34.13)较小,均反映岩浆分异程度比较低。铝质指数(A/CNK)为0.636~0.705,为准铝质系列(图6)。表明辉长岩类样品属钙碱性、准铝质岩石。

闪长岩类: SiO_2 含量为54.82%~59.62%, TAS 图解落入闪长岩区域,类型属中性岩类(图3)。里特曼指数(σ)为1.33~1.66,碱度率(AR)为1.51~1.55。在 SiO_2-K_2O 图解中落入钙碱性系列岩区与低钾(拉斑)系列岩区的交界区域(图4),在 $AR-SiO_2$ 图解中,所有样品落入钙碱性岩区(图5)。固结指数(SI 为34.09~37.08)较小,分异指数(DI 为48.34~53.74)较大,均反映岩浆分异程度较低。铝质指数(A/CNK)为0.954~1.120,为准铝质系列-过铝质系列(图6)。按照Chappell(1974)的划分标准,表明岩石属偏铝质岩石。因此,闪长岩类样品属钙碱性、偏铝质岩石。

4.2 稀土及微量元素特征

辉长岩类:其稀土总量较低,为 $38.92 \times 10^{-6} \sim 43.01 \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N$ 为1.92~2.05, $LREE$ 为 $28.52 \times 10^{-6} \sim 31.92 \times 10^{-6}$, $HREE$ 为 $10.39 \times 10^{-6} \sim 11.09 \times 10^{-6}$, $LREE/HREE$ 为2.74~2.88,表明轻重稀土之间分异较弱。轻稀土分馏程度 $(La/Sm)_N$ 为1.19~1.46,重稀土分馏程度 $(Gd/Yb)_N$ 为1.10~1.26,轻稀土分馏程度

与重稀土分馏程度相差不大。其微量元素含量与维氏辉长岩相比, Nb 、 Ta 、 Zr 、 Hf 均较低; Nb/Ta 为10.90~13.00、 Ba/Rb 为4.73~5.93, Zr/Hf 为27.25~29.61,皆低于原始地幔组成($Nb/Ta=17$; $Zr/Hf=36$ ^[32])。 Rb/Sr 为0.077~0.079,低于地壳平均值。

辉长岩稀土配分模式图中(图7),其分配模式与下地壳相似,稀土配分模式曲线向右倾斜,斜率较小, $\delta Eu = 1.18 \sim 1.20$,具有较强的铕正异常,异常较明显,这与辉长岩中大量存在的斜长石有关。原始地幔标准化微量元素蛛网图显示(图8),微量元

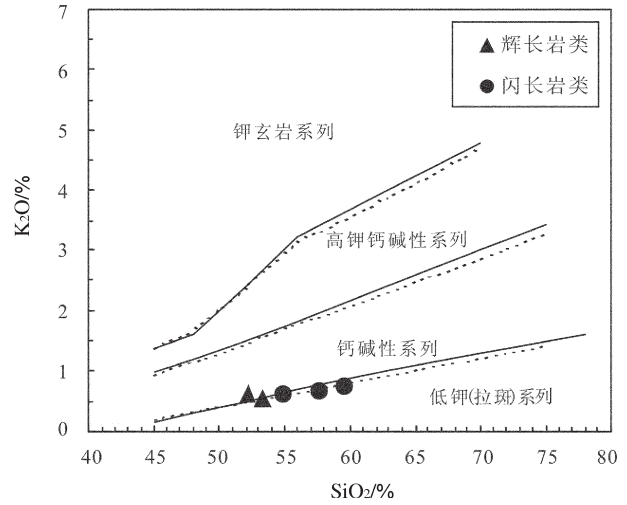


图4 SiO_2-K_2O 图解
Fig.4 SiO_2-K_2O diagram

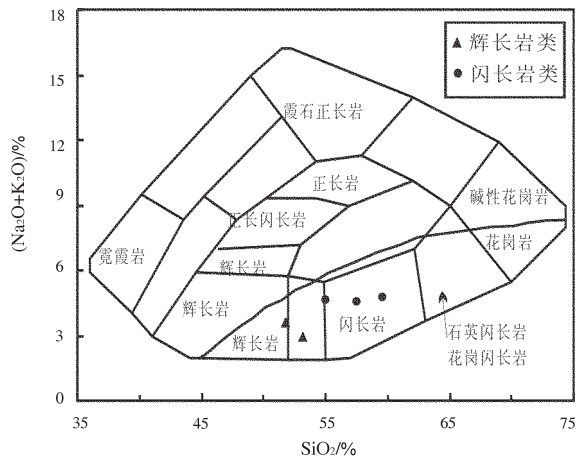


图3 侵入岩 TAS 图解
Fig. 3 TAS diagram of pluton

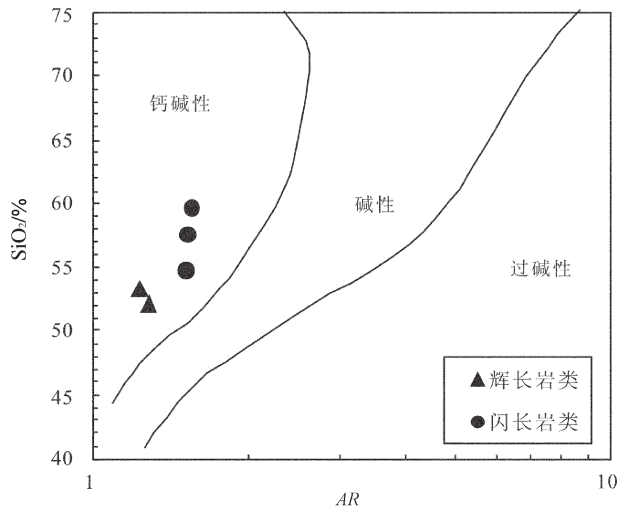


图5 $AR-SiO_2$ 图解
Fig.5 $AR-SiO_2$ diagram
 $AR=[Al_2O_3+CaO+(Na_2O+K_2O)]/[Al_2O_3+CaO-(Na_2O+K_2O)]$

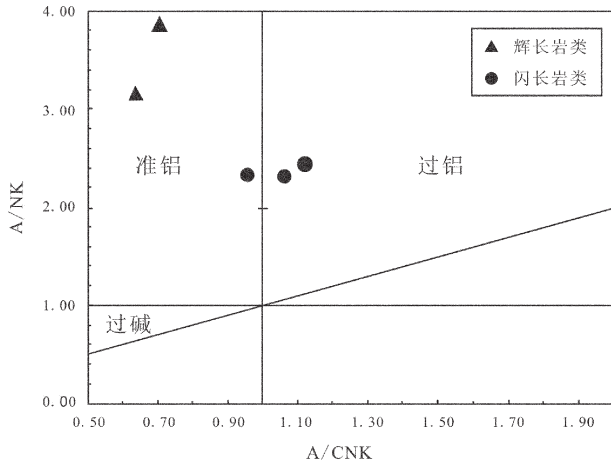


图6 A/CNK-A/NK图解

Fig.6 A/CNK-A/NK diagram

A/NK: $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$; A/CNK: $Al_2O_3/(Na_2O+CaO+K_2O)$

素整体分布区域平坦,除Rb、Sr以外,其余微量元素含量皆低于10倍含量原始地幔值。Sr的正异常指示了岩浆未发生斜长石的分异作用,以上总体反映该类侵入体岩浆分异程度较低,岩浆来源以地幔或下地壳为主的特征^[33]。

闪长岩类:其稀土总量较高,为 $90.54 \times 10^{-6} \sim 137.05 \times 10^{-6}$ 。稀土配分模式曲线向右倾斜,斜率较小, $\delta Eu = 0.50 \sim 0.76$,具有中等的铕负异常,铕谷明显。(La/Yb)_N为4.24~4.93, LREE为 $75.97 \times 10^{-6} \sim 120.14 \times 10^{-6}$, HREE为 $14.57 \times 10^{-6} \sim 16.91 \times 10^{-6}$, LREE/HREE为5.21~7.10,表明轻重稀土之间分异较弱。轻稀土分馏程度(La/Sm)_N为1.79~2.35,重稀土分馏程度(Gd/Yb)_N为1.14~1.38,轻稀土分馏程度大于重稀土分馏程度。其微量元素含量与维氏闪长岩相

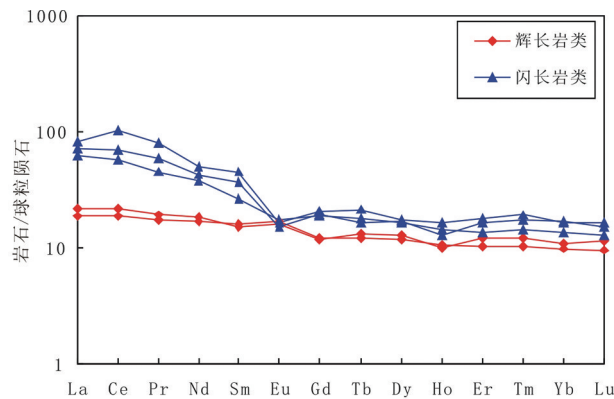


图7 侵入岩稀土元素配分型式图

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns of pluton

比,Nb、Ta显著高于参数值数倍,Zr、Hf略低于参数值。Nb/Ta为10.63~11.35, Ba/Rb为2.50~2.96、Zr/Hf为31.18~36.96,皆低于原始地幔组成(Nb/Ta=17; Zr/Hf=36; Sun and McDonough, 1989^[32])。Rb/Sr为0.147~0.205,低于地壳平均值。

闪长岩类稀土配分模式图上(图7),其分配模式与上地壳相似,微量元素蛛网中(图8),Rb、Ba、Th含量较低,Nb、Ta、P、Ti显示负异常,Nb和Ta的相对亏损指示其岩浆可能经历了富Nb、Ta矿物的结晶分异作用。P、Ti和Sr偏低可能与磷灰石、钛铁氧化物和斜长石的结晶分异有关。以上总体反映该类侵入体岩浆分异程度略低,岩浆来源以上地壳为主的特征。

4.3 锆石U-Pb年龄及Hf同位素

该岩体侵入地层为中泥盆统蕴都喀拉组。岩石新鲜,未发生变质、变形,其岩性特征等与邻区中晚泥盆纪侵入岩一致。本次工作,对该侵入体开展了同位素测年研究,并在该岩体的灰色角闪辉长岩中采取同位素(U-Pb法)年龄样1件。

不同成因锆石具有不同的Th、U含量和Th/U比值:岩浆锆石的Th、U含量较高,Th/U比值较大(一般>0.4);变质锆石的Th、U含量低,Th/U比值小(一般<0.1)。利用LA-ICP-MS对P18TW1样品进行了分析,共测定29个点,分析结果如表2所示,Th与U含量之间呈较好的正相关关系,其Th含量为 $251 \times 10^{-6} \sim 2851 \times 10^{-6}$, U含量为 $158 \times 10^{-6} \sim 3623 \times 10^{-6}$, Th/U比值变化范围为0.79~1.68(大于0.4),表明锆石均为岩浆成因,U-Pb表面年龄谐和性好,所有锆石均

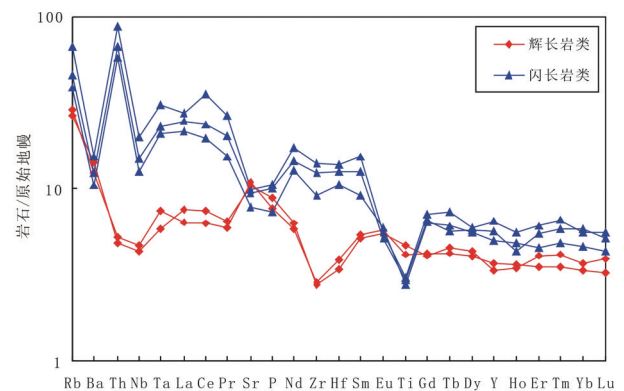


图8 侵入岩微量元素蛛网图

Fig.8 Primitive mantle-normalized trace element patterns of pluton

表1 西准噶尔玉什喀腊岩体主量元素(%)、微量和稀土元素(10^{-6})分析结果
 Table 1 Analyses of major elements, trace elements and REE from Yushenkala pluton in west Junggar

分析项目	P18YQ1	P18YQ3	P18YQ2	P18YQ4	P18YQ5
	角闪辉长岩	角闪辉长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩
SiO ₂	53.28	52.17	54.82	57.62	59.62
TiO ₂	0.85	0.82	1.27	1.89	1.93
Al ₂ O ₃	17.42	16.98	17.42	17.56	17.24
Fe ₂ O ₃	2.03	1.92	0.33	0.85	0.46
FeO	5.55	6.2	4.2	3.62	4.15
MnO	0.18	0.14	0.12	0.08	0.02
MgO	3.38	3.69	4.8	5.35	4.93
CaO	11.1	11.72	5.94	5.26	5.1
Na ₂ O	2.38	2.86	4.12	3.63	3.82
K ₂ O	0.56	0.62	0.63	0.58	0.45
P ₂ O ₅	0.19	0.15	0.17	0.15	0.19
烧失量	2.51	1.79	4.2	2.85	0.98
H ₂ O ⁺	1.56	1.42	1.96	1.87	1.82
H ₂ O ⁻	0.11	0.08	0.14	0.16	0.13
Total	100.99	100.48	99.98	100.31	100.41
K ₂ O/Na ₂ O	0.24	0.22	0.15	0.16	0.12
Na ₂ O+K ₂ O	2.94	3.48	4.75	4.21	4.27
A/CKN	0.705	0.636	0.954	1.12	1.061
δ	0.77	1.2	1.66	1.36	1.33
Rb	18.40	16.89	24.60	28.95	42.7
Ba	87.10	100.08	72.80	86.4	106.8
Th	0.44	0.41	4.92	5.68	7.45
Nb	3.35	3.12	9.04	10.64	14.3
Ta	0.31	0.24	0.85	0.94	1.26
Sr	231.50	220.30	164.30	197.6	208.54
Zr	32.30	31.09	102.00	138.5	157.46
Hf	1.19	1.05	3.27	3.89	4.26
Y	16.70	15.40	22.65	25.78	29.48
Sc	36.98	34.56	20.96	24.32	27.65
Cr	141.70	156.85	123.60	159.7	176.5
P	736.40	842.50	696.90	956.5	1006.4
La	4.4	5.2	14.7	16.9	18.9
Ce	11.3	13.2	34.8	41.7	62.6
Pr	1.6	1.8	4.3	5.6	7.4
Nd	7.9	8.5	17.2	19.6	23.5
Sm	2.4	2.3	4.0	5.6	6.8
Eu	0.97	0.92	0.99	0.87	0.94
Gd	2.51	2.43	3.83	3.95	4.28
Tb	0.45	0.49	0.66	0.61	0.79
Dy	2.98	3.20	4.11	4.26	4.35
Ho	0.60	0.57	0.79	0.72	0.92
Er	1.70	1.98	2.20	2.65	2.92
Tm	0.26	0.31	0.36	0.43	0.49
Yb	1.65	1.82	2.29	2.86	2.75
Lu	0.24	0.29	0.32	0.38	0.41
Σ REE	38.92	43.01	90.54	106.13	137.05
LREE/HREE	2.74	2.88	5.21	5.69	7.10
δ Eu	1.20	1.18	0.76	0.54	0.50
(La/Yb) _N	1.92	2.05	4.61	4.24	4.93

落在谐和线上,数据点成群分布(图9),²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为(364±1) Ma(MSWD=0.92),代表了岩体的结晶年龄,为晚泥盆世,符合区域地质背景。

在U-Pb定年的基础上,对其中12颗锆石进行了Lu-Hf同位素分析(表3)。以 $t = 364$ Ma 计算出锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf初始值为0.282678~0.282876,对应的

$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为4.3~11.5,均为正值,加权平均值为(9.0±1.2)(MSWD=1.05),表明其母岩浆来源于亏损地幔源区,在上升过程中几乎没有,或很少受壳源物质的污染(图10-B)。由于 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值,因此对其进行一阶段Hf模式年龄计算,得到的一阶段模式年龄 T_{DM1} 为529~827 Ma(平均值为(629±95) Ma)(MSWD=

表2 玉什喀腊岩体角闪辉长岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb同位素测定结果(P18TW1)
Table 2 The results of LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope dating for hornblende gabbro from Yushenkala pluton

测点	含量/ 10^{-6}		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Pb	Th		U	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	表面年龄/Ma	1 σ	表面年龄/Ma	1 σ	表面年龄/Ma
01	14	262	192	0.0544	0.0016	0.4367	0.0125	0.0582	0.0003	389	64	368	11	365	2
02	229	2851	3623	0.0544	0.0004	0.4345	0.0031	0.0579	0.0003	387	15	366	3	363	2
03	29	586	399	0.0541	0.0007	0.4338	0.0055	0.0581	0.0003	377	28	366	5	364	2
04	16	315	221	0.0564	0.0014	0.4498	0.0117	0.0578	0.0003	470	56	377	10	362	2
05	13	251	186	0.0558	0.0014	0.4459	0.0111	0.0580	0.0003	445	54	374	9	363	2
06	48	1027	639	0.0543	0.0006	0.4345	0.0046	0.0580	0.0003	385	24	366	4	363	2
07	14	275	192	0.0550	0.0015	0.4369	0.0120	0.0577	0.0003	410	61	368	10	361	2
08	17	313	244	0.0537	0.0014	0.4321	0.0111	0.0584	0.0003	358	57	365	9	366	2
09	15	299	202	0.0550	0.0011	0.4396	0.0088	0.0580	0.0003	413	45	370	7	363	2
10	12	260	158	0.0552	0.0017	0.4436	0.0139	0.0583	0.0003	420	69	373	12	365	2
11	54	996	768	0.0540	0.0005	0.4334	0.0039	0.0582	0.0003	370	20	366	3	365	2
12	31	666	407	0.0533	0.0008	0.4321	0.0064	0.0588	0.0003	342	34	365	5	368	2
13	20	403	264	0.0547	0.0009	0.4356	0.0070	0.0577	0.0003	401	35	367	6	362	2
14	19	396	263	0.0538	0.0008	0.4293	0.0069	0.0579	0.0003	362	35	363	6	363	2
15	16	345	221	0.0540	0.0013	0.4350	0.0104	0.0584	0.0003	373	53	367	9	366	2
16	24	525	318	0.0547	0.0009	0.4355	0.0070	0.0577	0.0003	402	36	367	6	362	2
17	18	334	245	0.0540	0.0009	0.4337	0.0076	0.0583	0.0003	371	39	366	6	365	2
18	14	307	183	0.0547	0.0015	0.4356	0.0117	0.0578	0.0003	399	60	367	10	362	2
19	12	272	163	0.0538	0.0016	0.4305	0.0127	0.0580	0.0003	364	66	364	11	364	2
20	26	470	348	0.0538	0.0008	0.4328	0.0067	0.0583	0.0004	364	33	365	6	365	2
21	21	439	281	0.0532	0.0009	0.4272	0.0075	0.0583	0.0003	336	39	361	6	365	2
22	15	312	201	0.0539	0.0012	0.4297	0.0100	0.0579	0.0003	365	52	363	8	363	2
23	24	481	342	0.0540	0.0010	0.4298	0.0081	0.0577	0.0003	371	41	363	7	362	2
24	41	703	610	0.0538	0.0005	0.4300	0.0042	0.0579	0.0003	364	21	363	4	363	2
25	50	1014	698	0.0540	0.0005	0.4325	0.0042	0.0580	0.0003	373	21	365	4	364	2
26	14	283	196	0.0540	0.0012	0.4326	0.0100	0.0581	0.0003	373	51	365	8	364	2
27	17	344	240	0.0547	0.0011	0.4362	0.0094	0.0578	0.0003	401	47	368	8	362	2
28	45	948	628	0.0544	0.0005	0.4411	0.0046	0.0589	0.0003	386	22	371	4	369	2
29	15	335	211	0.0542	0.0014	0.4387	0.0113	0.0588	0.0003	377	57	369	10	368	2

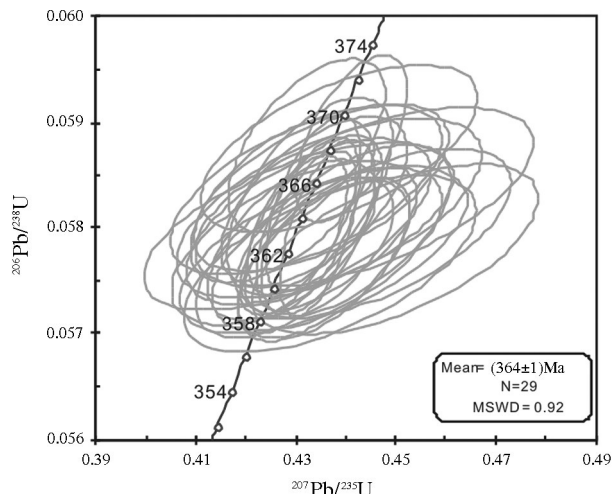


图9 角闪辉长岩锆石U-Pb一致曲线图

Fig. 9 U-Pb concordia diagram of hornblende gabbro zircons

0.28), 指示其原岩为寒武-早寒武基底^[34-35] (图10-A)。

4.4 构造环境

岩浆岩岩石的化学成分可用于探讨岩石起源的大地构造背景^[36,37], 其中的高场强元素, 如Nb、Ta、Zr、Hf以及HREE不易受后期热液蚀变和低角闪石相的变质作用的影响^[37-38]。因此, 可以用这些元素对岩浆源区进行判别。在2Nb-Zr/4-Y图解中(图11-a), 其成分点落入C区和D区(火山弧玄武岩区), 在Hf/3-Th-Nb/16图解中(图11-b), 样品点落入B区和D区(火山弧玄武岩), 指示该侵入体可能形成于岛弧环境, 或类似活动陆缘环境。

5 讨论

5.1 岩石成因

根据Sm/Yb-La/Sm图解(图12), 辉长岩的岩浆可能为亏损尖晶石二辉橄榄岩地幔发生5%~10%的部分熔融之后形成, 闪长岩类的岩浆可能为亏损尖晶石二辉橄榄岩地幔发生5%~30%的部分熔融之后形成^[39]。

因此, 玉什喀腊岩体为俯冲流体交代亏损的岩石圈地幔形成的, 即洋陆俯冲过程中受俯冲流体影响的亏损地幔橄榄岩部分熔融的结果, 岩浆在上升过程中没有遭受地壳物质的混染。

5.2 时代及构造属性

新疆北部准噶尔地区广泛发育晚古生代后碰撞花岗岩, 包括天山-准噶尔-阿尔泰在内的中亚造山带, 主碰撞发生在泥盆纪末-石炭纪初, 后碰撞330~250 Ma, 目前还没有证据显示准噶尔地区还存在(同)碰撞花岗岩。但是韩宝福等^[12]获得的花岗岩SHRIMP锆石U-Pb定年结果揭示, 除大量的晚古生代后碰撞花岗岩外, 西准噶尔确实还存在早泥盆纪世早期的花岗岩, 其²³⁸U/²⁰⁶Pb加权平均年龄为413 Ma。这个时期的花岗岩在天山^[11,40]、阿尔泰山均有报道^[4]。我们课题组最新的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年结果表明: 西准噶尔确实存在早泥盆纪早期的花岗岩, 我们测试的数据为416 Ma(未发表数据), 与韩宝福等所研究在误差范围内是一致的。对于该时期花岗岩的分布、规模和构造属性等

表3 玉什喀腊岩体角闪辉长岩锆石Lu-Hf同位素组成

Table 3 Zircon Lu-Hf isotope date for hornblende gabbro from Yushenkala pluton

测点号	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (t) ^a	2σ	T _{DM1} /Ma	2σ	T _{DM2} /Ma	2σ
01	0.282876	0.000018	0.0008	0.0176	3.7	11.5	0.6	530	52	741	83
02	0.282778	0.000017	0.0016	0.0343	0.2	7.8	0.6	683	49	1074	76
03	0.282829	0.000019	0.0035	0.0905	2.0	9.2	0.7	643	59	953	88
04	0.282833	0.000017	0.0022	0.0512	2.2	9.6	0.6	613	50	910	77
05	0.282841	0.000020	0.0022	0.0511	2.4	9.9	0.7	602	58	885	89
06	0.282810	0.000030	0.0010	0.0257	1.3	9.1	1.1	628	85	960	135
07	0.282743	0.000015	0.0009	0.0213	-1.0	6.8	0.5	720	44	1170	69
08	0.282875	0.000018	0.0006	0.0140	3.6	11.5	0.6	529	51	741	82
09	0.282773	0.000018	0.0016	0.0347	0.0	7.7	0.6	690	52	1090	82
10	0.282678	0.000018	0.0016	0.0441	-3.3	4.3	0.6	827	52	1394	81
11	0.282742	0.000018	0.0018	0.0411	-1.1	6.5	0.6	739	52	1194	81
12	0.282849	0.000019	0.0004	0.0093	2.7	10.6	0.7	563	53	822	86

注: a- Hf初始比值采用t=364 Ma进行计算。

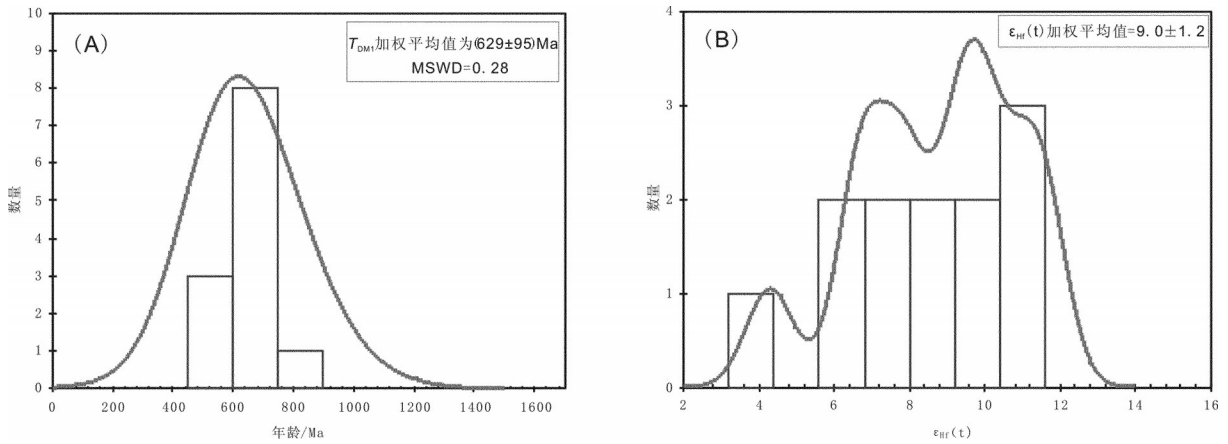


图10 角闪辉长岩锆石一阶段Hf模式年龄(A)和 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(B)柱状分布图

Fig.10 The one-stage Hf model age of hornblende gabbro zircon and column distribution of $\epsilon_{Hf}(t)$ diagrams

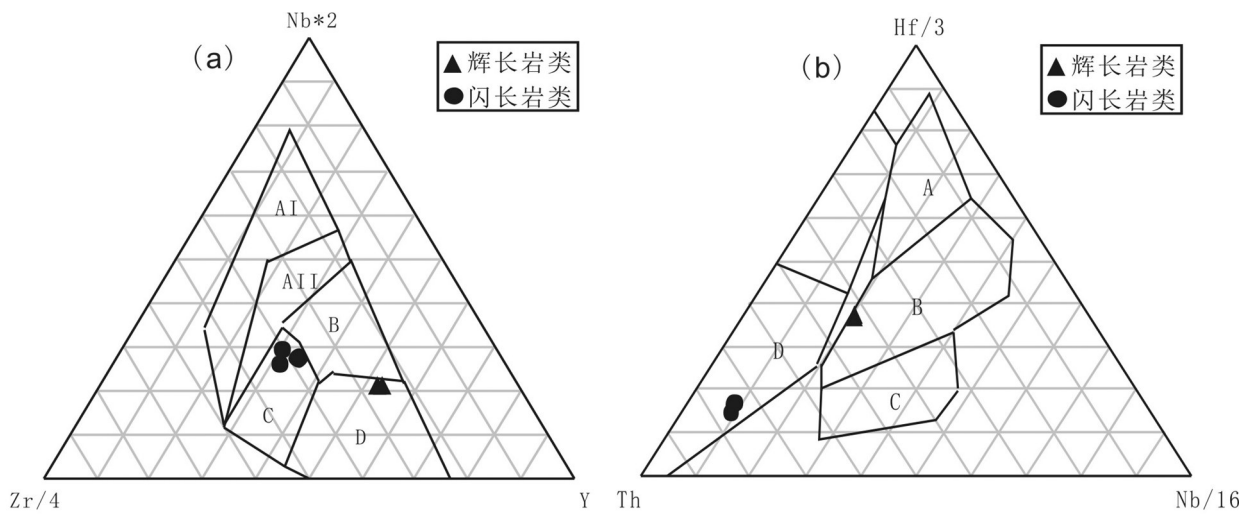


图11 玉什喀腊岩体的2Nb-Zr/4-Y(a)和Hf/3-Th-Nb/16(b)构造背景判别图解^[36,37](底图据文献[36-37])

(a)A1—板内碱性玄武岩,A2—板内拉斑玄武岩和板内碱性玄武岩,B—富集型洋脊玄武岩,C—板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩,D—正常洋脊玄武岩和火山弧玄武岩;(b)A—N型(正常型)洋中脊玄武岩,B—E型(富集型)洋中脊玄武岩,C—板内大陆拉斑玄武岩,D—岛弧钙碱性玄武岩

Fig.11 The 2Nb-Zr/4-Y(a) and Hf/3-Th-Nb/16 (b) distribution diagrams of Yushenkala pluton (base map after references[36,37])

(a) A1-WPA, A2-WPT and WPA, B-P-type MORB, C-WPT and VAB, D-N-type MORB and VAB;

(b) A-N-type MORB, B-E-type MORB, C-WPB, D-CAB

问题仍然是需要进一步研究的,但若准噶尔地区不存在与碰撞有关的深成岩浆活动,那么早泥盆纪早期花岗岩的形成就可能与俯冲碰撞过程有关。准噶尔后碰撞深成岩浆活动的时限限定了碰撞事件应发生在 340 Ma 以前。如果后碰撞深成岩浆活动是在碰撞事件结束之后不久开始发生的^[41],那么准噶尔地区的碰撞事件可能发生在晚泥盆世至早石炭世初^[12]。这一结论与王京彬等^[42]依据新疆北部地

区的火山-沉积岩层得出的后碰撞作用的时限(早石炭世维宪期—二叠世)基本吻合。泥盆纪末的岩浆侵入活动在准噶尔北缘尚属首次发现,既使在额尔齐斯—玛因鄂博构造带以北的阿尔泰山造山带内,目前尚未有 360 Ma 左右的花岗岩的精确定年报道,大面积发育的同碰撞花岗岩形成时代为 460~370 Ma^[43]。周刚等^[44]报道了准噶尔北东缘乌图布拉克岩体的 SHRIMP U-Pb 年龄为 (360.1±3.6)Ma,他们

认为阿尔泰造山带后碰撞时限可能为360~290 Ma,即泥盆纪末—石炭纪末。郭召杰^[45]认为新疆北部地区在晚石炭世之前已完成洋盆俯冲和碰撞拼贴造山过程,同时他认为东准噶尔卡拉麦里造山带的碰撞时限不晚于早石炭世(370~340 Ma)。

杨树德等^[46]认为新疆北部在古生代时期分别存在准噶尔、北天山和南天山3个大洋,3个大洋在奥陶纪之前已经打开,但闭合时间不尽相同,分别为中泥盆世、早石炭世和晚泥盆世。众多研究也显示,在准噶尔地块(哈萨克斯坦—准噶尔板块)与阿尔泰造山带(属西伯利亚板块)之间,在泥盆纪时分布着一个古生代的古亚洲洋。关于古亚洲洋存在的时限还有不同的认识:如是否是从早古生代一直延续至晚古生代^[47,48]。许继峰等^[47]认为由于Adakite岩石只有在一个大洋板片俯冲的早期阶段才会形成,并且北准噶尔地区的最早的岛弧火山岩形成于早泥盆世,同时厘定出的Adakite岩石就分布在早泥盆统托让格库都克组之中。刘德权等^[48]根据北准噶尔存在的博宁岩认为该区为泥盆纪洋内弧。近年来,众多学者^[47,49]在该区域厘定出埃达克岩和富铋玄武岩组合,时代为早、中泥盆世,埃达克质侵入岩为中泥盆世(381~376 Ma)^[16],指示该区在早、中泥盆世存在板块的俯冲活动。因此,他们认为准噶尔地块北侧的古亚洲洋很有可能在早泥盆世是存在的。但是古亚洲洋闭合的时间呢?目前主要有3种认识:一是二叠纪末至三叠纪^[50-51],二是早石炭末^[52],三是晚泥盆末至早石炭世初^[53,54]。许多学者认为,在经历过若干微陆块之间、微陆块与南北大陆之间的碰撞之后,直至晚泥盆—早石炭世古亚洲洋最终封闭^[55-57]。也有研究认为^[58],西准噶尔在石炭纪已处于残留海盆阶段,至石炭世末残留海盆封闭并导致西准噶尔地区全面结束大洋发展阶段,且进入陆内造山,开始稳定的大陆发展历程。尹继元等^[59]认为西准噶尔地区直到早二叠世早期(290 Ma)仍有残余洋盆存在,并可能存在相关的俯冲活动。徐学义等^[60]认为南天山为古亚洲洋在中国境内最后闭合的位置,时限为早石炭末期。

通过对玉什喀腊一带岩体研究表明,晚古生代的泥盆纪准噶尔再次遭受拉张,沿准噶尔北东部的科克森套—乔夏哈拉和南西部的达拉布特—卡拉麦里扩张形成两个洋盆。在科克森套—乔夏哈拉

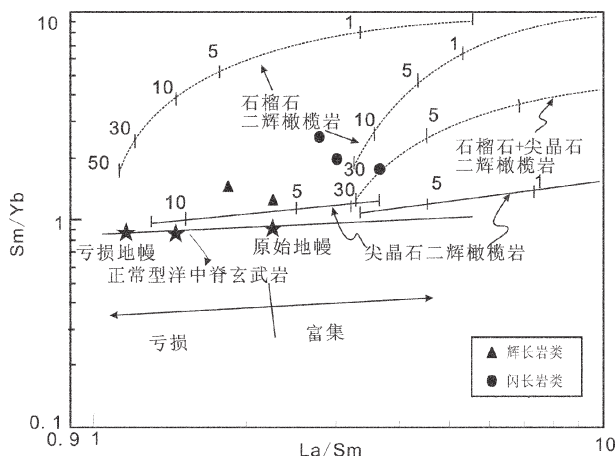


图12 La/Sm-Sm/Yb图解(文献[39])

Fig. 12 La/Sm versus Sm/Yb diagram (after reference [39])

一带,分别沿研究区北部的科克森套、阿尔曼泰—北塔山北坡和卡拉麦里—莫钦乌拉等地产生洋壳。从早泥盆世中、晚期开始,准噶尔北东部的洋盆向北东俯冲、聚敛,在研究区南部形成北西向展布的萨吾尔晚古生代岛弧带,北部形成北西向展布的(卡尔巴—哈巴河晚古生代)弧前盆地的古地理构造格局。此次板块聚敛,造成该区发生了较为强烈的火山爆发,形成了区内及区域上中泥盆统蕴都喀拉组火山—沉积(半深海—浅海相陆缘碎屑岩)建造(图13-A)。至晚泥盆世准噶尔北东部的洋盆闭合(局部转为残余海盆),形成查尔斯克(或科克森套)—乔夏哈拉板块缝合带,同时研究区北部的科克森套一带隆起成陆(图13-B),并伴随有大规模压扭性逆断裂和钙碱性系列岩浆岩侵入,形成本文所讨论的晚泥盆世中细粒辉长岩、细粒闪长岩侵入体。这与周刚等^[44]认为该区域岛弧(洋内弧)活动主要集中于早、中泥盆世,到晚泥盆世已基本结束。晚泥盆世虽存在岩浆侵入活动,但没有与之相伴的大规模火山活动,是一致的。

早石炭世板块停止俯冲,在岛弧的后方出现局部拉张状态,在查尔斯克(或科克森套)—乔夏哈拉板块缝合带附近的构造薄弱部位,形成裂陷槽,并逐渐演变成洋壳,研究区西南部的玛勒玛北一带至东邻区那林卡拉它乌一带出现弧后盆地。形成了区内那林卡拉组浅海相—海陆交互相陆缘碎屑岩建

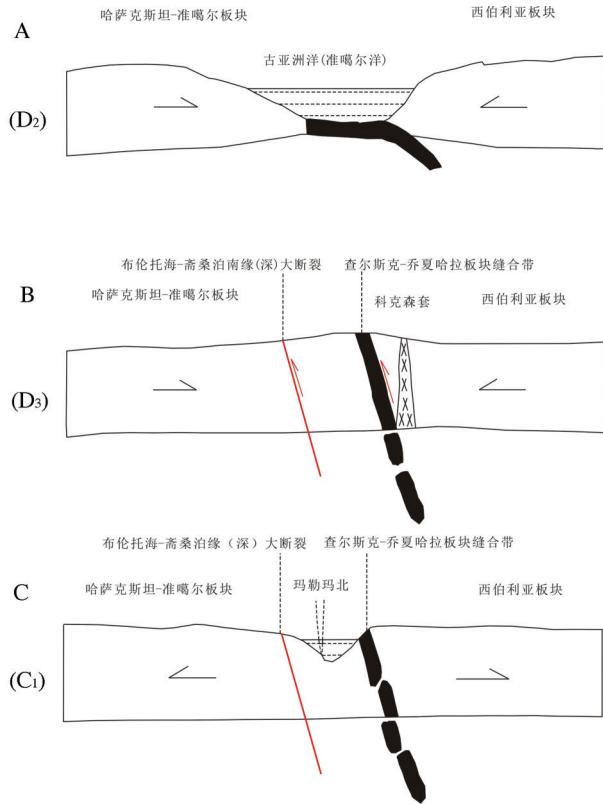


图 13 板块构造演化示意图

Fig. 13 The sketch diagram of plate tectonic evolution

造(图 13-C)。早石炭世末裂陷槽封闭,哈萨克斯坦—准噶尔和西伯利亚两大板块完全对接在一起,多陆块、洋盆与活动陆缘长期并存的洋-陆演化格局最终结束。

6 结 论

(1)玉什喀腊岩体为俯冲流体交代亏损的岩石圈地幔形成的,岩浆在上升过程中没有遭受地壳物质的混染。辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(364 \pm 1) \text{Ma}$, 为辉长岩结晶的年龄。

(2)玉什喀腊侵入体可能形成于岛弧环境,或类似活动陆缘环境。晚泥盆世洋陆俯冲事件已基本结束,古亚洲洋闭合的时间不早于 364 Ma。

致谢:成文中中国地质大学吴元保教授提出了宝贵的意见,锆石测年及数据处理在天津地质矿产研究所耿建珍的帮助下完成;Hf 同位素测试得到了中科院地质与地球物理研究所的帮助完成,在此对他们的热心帮助和辛勤付出表示由衷感谢。

参考文献(Reference):

- [1] 韩宝福, 王式洗, 孙元林, 等. 新疆乌伦古河碱性花岗岩 Nd 同位素特征及其对显生宙地壳生长的意义[J]. 科学通报 1997, 42(17): 1829-1832.
Han Baofu, Wang Shiguang, Sun Yuanlin, et al. The Nd isotope of Wulunguhe alkaline granite from Xinjiang and the significance to the Phanerozoic crust growth[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(17): 1829-1832(in Chinese with English abstract).
- [2] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. Episodes, 2000, 22: 82-92.
- [3] Jahn B M, Windley B, Natal'in B, et al. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23: 599-603.
- [4] Windley B F, Kroner A, Guo J H, et al. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. The Journal of Geology, 2002, 110: 719-737.
- [5] Xiao W J, Windley B F, Badarch G, et al. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: Implications for the growths of Central Asia[J]. Journal of the Geological Society, 2004, 161: 339-342.
- [6] Chen B, Jahn B M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 3: 691-703.
- [7] Zhu Y F, Zeng Y S, Gu L B. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No.3 vein and related granites in the Keketouhai region, Altay Mountains, Northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 27: 61-77.
- [8] 翁凯, 张雪, 马中平, 等. 萨吾尔山松树沟地层形成时代及火山岩地球化学研究[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1438-1451.
Weng Kai, Zhang Xue, Ma Zhongping, et al. The formation age and volcanic rock geochemical study of Songshugou strata in the Sawuer Mountain[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1438-1451(in Chinese with English abstract).
- [9] 韩宝福, 何国琦, 王式洗, 等. 新疆北部碰撞后幔源岩浆活动与陆壳纵向生长[J]. 地质论评, 1998, 44(4): 396-406.
Han Baofu, He Guoqi, Wang Shiguang, et al. Postcollisional mantle-derived magmatism and vertical growth of the continental crust in North Xinjiang[J]. Geological Review, 44(4): 396-406 (in Chinese with English abstract).
- [10] 韩宝福, 何国琦, 王式洗, 等. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底性质[J]. 中国科学(D辑), 1999, 42(2): 113-119.
Han Baofu, He Guoqi, Wang Shiguang. Postcollisional Mantle-derived Magmatism, Underplating and Implications for Basement of the Junggar Basin[J]. Science in China(Series D), 1999, 2: 113-119 (in Chinese).

- [11] 高睿, 肖龙, 王国灿, 等. 西准噶尔晚古生代岩浆活动和构造背景[J]. 岩石学报, 2013, 29(10): 3413–3434.
Gao Rui, Xiao Long, Wang Guocan, et al. Paleozoic magmatism and tectonic setting in West Juggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(10): 3413–3434 (in Chinese with English abstract).
- [12] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(1)一后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 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(5): 1077–1086 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李锦轶, 徐新. 新疆北部地质构造和成矿作用的主要问题[J]. 新疆地质, 2004, 22(2): 119–124.
Li Jinyi, Xu Xin. Major problems on geologic structures and metallogenesis of northern Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 2004, 22(2): 119–124 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王涛, 洪大卫, 童英, 等. 中国阿尔泰造山后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 640–650.
Wang Tao, Hong Dawei, Tong Ying, et al. Zircon U–Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for vertical continental growth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 640–650 (in Chinese with English abstract).
- [15] 牛贺才, 于学元, 许继峰, 等. 中国新疆阿尔泰晚古生代火山作用及成矿[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1–50.
Niu Hecai, Yu Xueyuan, Xu Jifeng, et al. Late Paleozoic Volcanism and Associated Metallogenesis in the Altai Area, Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1–50 (in Chinese).
- [16] 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩: SHRIMP U–Pb 锆石年龄证据[J]. 科学通报, 2006, 51(13): 1565–1574.
Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating for subduction-related granitic rocks in the northern part of east Junggar, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(8): 952–962(in Chinese).
- [17] 张招崇, 周刚, 闫升好, 等. 阿尔泰南缘晚古生代火山岩的地质地球化学特征及其对构造演化的启示[J]. 地质学报, 2007, 81(3): 344–358.
Zhang Zhaochong, Zhou Gang, Yan Shenghao, et al. Geology and geochemistry of the Late Paleozoic volcanic rocks of the south margin of the Altai Mountains and implications for tectonic evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(3): 344–358 (in Chinese with English abstract).
- [18] 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1933–1944.
Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, et al. Ages and origin of the Early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 1933–1944 (in Chinese with English abstract).
- [19] 周刚, 张招崇, 罗世宾, 等. 新疆阿尔泰山南缘玛因鄂博高温型强过铝花岗岩: 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1909–1920.
Zhou Gang, Zhang Zhaochong, Luo Shibin, et al. Confirmation of high-temperature strongly peraluminous Mayinebo granites in the south margin of Altai, Xinjiang: Age, geochemistry and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 1909–1920 (in Chinese with English abstract).
- [20] 靳松, 张兆祚, 陈志彬, 等. 新疆吉木乃县恰其海 A 型花岗岩的地球化学特征、年代学及构造意义[J]. 地球学报, 2010, 31(6): 803–812.
Jin Song, Zhang Zhaoyi, Chen Zhibin, et al. Geochemistry Characteristics, Geochronology and Structure Implications of A-type Granite from Qiaqihai Rock Body in Jimunai Area, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(6): 803–812 (in Chinese with English abstract).
- [21] 靳松, 张兆祚, 荣桂林, 等. 新疆西准噶尔哈尔加乌组地层重新厘定及其意义——来自地质地球化学和年代学的证据[J]. 矿物岩石, 2013, 33(1): 77–86.
Jin Song, Zhang Zhaoyi, Rong Guilin, et al. Redefinition of Haerjiawu formation and its significance in West Junggar, Xinjiang: Constraints from geology geochemistry and geochronology of evidence[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2013, 33(1): 77–86 (in Chinese with English abstract).
- [22] 何国琦, 韩宝福, 岳永君. 中国阿勒泰造山带的构造划分和地壳演化[J]. 新疆地质, 1990, 2: 9–20.
He Guoqi, Han Baofu, Yue Yongjun. The structural division and crustal evolution of Altai orogenic belt, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 1990, 2: 9–20 (in Chinese with English abstract).
- [23] 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(5): 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(5): 1062–1076 (in Chinese with English abstract).
- [24] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1–169.
Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, et al. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1–169(in Chinese).
- [25] 曲国胜, 何国琦. 阿尔泰造山带的构造运动[J]. 地质学报, 1992, 66(3): 193–205.

- Qu Guosheng, He Guoqi. The orogeny in the Altaides[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1992, 66(3):193-205 (in Chinese with English abstract).
- [26] Sengor A M C, Natal' in B A, Burtman V S. Evolution of the Altai tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.
- [27] 牛贺才, 许继峰, 于学元, 等. 新疆阿尔泰富镁火山岩系的发现及其地质意义[J]. *科学通报*, 1999, 44(9): 1002-1004.
- Niu Hecai, Xu Jifeng, Yu Xueyuan, et al. Discovery of Mg-rich volcanic rock series in the Chinese Altay, and its geological implication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(9):1002-1004 (in Chinese).
- [28] 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. *矿物学报*, 2009, S1: 600-601.
- Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, et al. The Study of Determination Zircon U-Pb Isotopic Age using Laser Ablation Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-MC-ICPMS) [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, S1: 600-601(in Chinese).
- [29] Wu Fuyuan, Yang Yueheng, Xie Liewen, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. *Chem. Geol.*, 2006, 234:105-126.
- [30] Goolaerts A, Mattioli N, De Jong J, et al. Hf and Lu isotopic reference values for the zircon standard 91500 by MC-ICP-MS[J]. *Chem. Geol.*, 2004, 206:1-9.
- [31] Woodhead J, Hergt J, Shelley M, et al. Zircon Hf- isotopic analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation[J]. *Chem. Geol.*, 2004, 209:121-135.
- [32] Sun Shensu, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of oceanic basalts: Implications for Mantle Composition and processes[C]//Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989, 42: 313-345.
- [33] 黎敦朋, 李新林, 周小康, 等. 塔里木西南缘新太古代变质辉长岩脉的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2007, 34(2): 262-269.
- Li Dunpeng, Li Xinlin, Zhou Xiaokang, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of Neoproterozoic metagabbro dikes on the southwestern margin of the Tarim plate and its significance[J]. *Geology in China*, 2007, 34 (2): 262-269(in Chinese with English abstract).
- [34] 黄志英, 戚学祥, 唐贯宗, 等. 腾冲地块内早印支期构造事件的厘定—来自那邦闪长岩锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素证据[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 730-741.
- Huang Zhiyin, Qi Xuexiang, Tang Guanzong, et al. The identification of early Indosinian tectonic movement in Tengchong block, western Yunnan: Evidence of zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope for Nabang diorite[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 730-741(in Chinese with English abstract).
- [35] 杨阳, 王晓霞, 柯昌辉, 等. 豫西南泥湖矿集区石宝沟花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及 Hf 同位素组成[J]. *中国地质*, 2012, 39(6): 1525-1542.
- Yang Yang, Wang Xiaoxia, Ke Changhui, et al. Zircon U-Pb age, geochemistry and Hf isotopic compositions of Shibaogou granitoid pluton in the Nannihu ore district, western Henan Province[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6):1525-1542(in Chinese with English abstract).
- [36] Pearce J A, Cann J R. Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr and Y[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1971, 12(3): 339-349.
- [37] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2): 290-300.
- [38] Winchester JA and Floyd PA. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1997, 20: 325-343.
- [39] Aldanmaz E, Pearce JA, Thirlwall MF et al. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey[J]. *Volcan. Geotherm. Res.*, 2000, 102(1/2): 67-95.
- [40] 杨天南, 李锦轶, 孙桂华, 等. 中天山早泥盆世陆弧:来自花岗岩质糜棱岩地球化学及 SHRIMP U-Pb 定年的证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 41-48.
- Yang Tiannan, Li Jinyi, Sun Guihua, et al. Earlier Devonian active continental arc in Central Tianshan: Evidence of geochemical analyses and zircon SHRIMP dating on mylonitized granitic rock[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 41-48 (in Chinese with English abstract).
- [41] Bonin B. Do coeval mafic and felsic magmas in Post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review[J]. *Lithos*, 2004, 78(1/2): 1-24.
- [42] 王京彬, 徐新. 新疆北部后碰撞构造演化[J]. *地质学报*, 2006, 80 (1):23-31.
- Wang Jingbin, Xu Xin. Post-collisional Tectonic Evolution and Metallogenesis in Northern Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(1): 23-31(in Chinese with English abstract).
- [43] Wang T, Hong DW, Jahn BM, et al. Timing, Petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. *The Journal of Geology*, 2006, 214: 735-751.
- [44] 周刚, 吴淦国, 董连慧, 等. 新疆准噶尔北东缘乌图布拉克岩体形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(6): 1390-1402.
- Zhou Gang, Wu Ganguo, Dong Lianhui, et al. Formation time and geochemical feature of Wutubulak pluton in the northeastern margin of Junggar in Xinjiang and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6):1390-1402 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [45] 郭召杰. 新疆北部大地构造研究中几个问题的评述—兼论地质图在区域构造研究中的重要意义[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1054–1060.
Guo Zhaojie. A review on the Paleozoic tectonic evolution of northern Xinjiang and a discussion on the important role of geological maps in tectonic study[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1054–1060 (in Chinese with English abstract).
- [46] 杨树德. 新疆北部的古板块构造[J]. 新疆地质, 1994, 12(1): 1–8.
Yang Shude. Ancient plate tectonics in Northern Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 1994, 12(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- [47] 许继峰, 梅厚均, 于学元, 等. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的adakite火山岩: 消减板片部分熔融的产物[J]. 科学通报, 2001, 46(8): 684–687.
Xu JiFeng, Mei Houjun, Yu Xueyuan, et al. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic: Products of slab melting[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(8): 684–687 (in Chinese).
- [48] 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 新疆北准噶尔泥盆纪洋内弧及博宁岩[J]. 新疆地质, 1993, 11(1): 1–12.
Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. Devonian intraoceanic arc and boninite in North Junggar, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 1993, 11(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- [49] 张海祥, 牛贺才, Hiroaki SATO, 等. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铌玄武岩组合: 古亚洲洋板块南向俯冲的证据[J]. 高校地质学报, 2004, 10(1): 106–113.
Zhang Haixiang, Niu Hecai, Hiroaki S, et al. Late Paleozoic adakite and Nb-enriched basalt from northern Xinjiang: Evidence for the southward subduction of the Paleo-Asian Ocean[J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(1): 106–113 (in Chinese with English abstract).
- [50] Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. Middle Cambrian 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(2–4): 102–117.
- [51] Xiao WJ, Windley B F, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altai: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. Int. J. Earth Sci., 2009, 98(6): 1189–1217.
- [52] 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 148–167.
Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, et al. Crust Tectonic Framework of Northern Xinjiang and Adjacent Regions and its Formation[J]. Acta Geologica Sinica, 80(1): 148–167 (in Chinese with English abstract).
- [53] Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, et al. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan Mountains, northwestern China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116(3): 419–433.
- [54] Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, et al. Relative contributions of crust and mantle to the generation of the Tianshan Carboniferous rift-related basic lavas, northwestern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 31(4–6): 357–378.
- [55] 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 1994, 68(3): 217–230.
Hong Dawei, Huang Huaizeng, Xiao Yijun, et al. The Permian alkaline granites in central inner Mongolia and their geodynamic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(3): 217–230 (in Chinese with English abstract).
- [56] Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M M. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean[J]. International Geol. Rev., 1995, 37: 335–360.
- [57] Khain E V, Bibikova E V, Kroner A, et al. The most ancient ophiolite of the central Asian fold belt: U–Pb and Pb–Pb zircon ages for the DunZhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 2002, 199: 311–325.
- [58] 朱宝清, 冯益民. 新疆西准噶尔板块构造及演化[J]. 新疆地质, 1994, 12(2): 91–105.
Zhu Baoqing, Feng Yimin. Plate tectonics and evolution in west Junggar of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 1994, 12(2): 91–105 (in Chinese with English abstract).
- [59] 尹继元, 袁超, 王毓婧, 等. 新疆西准噶尔晚古生代大地构造演化的岩浆活动记录[J]. 大地构造与成矿, 2011, 35(2): 278–291.
Yin Jiyuan, Yuan Chao, Wang Yujing, et al. Magmatic records on the Late Paleozoic tectonic evolution of Western Junggar, Xinjiang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(2): 278–291 (in Chinese with English abstract).
- [60] 徐学义, 李荣社, 陈隽璐, 等. 新疆北部古生代构造演化的几点认识[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1521–1534.
Xu Xueyi, Li Rongshe, Chen Junlu, et al. New constrains on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1521–1534 (in Chinese with English abstract).