

doi: 10.12029/gc20160403

毕政家, 曾忠诚, 张昆昆, 等. 阿尔金南缘帕夏拉依档沟斜长角闪岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1149–1164.

Bi Zhengjia, Zeng Zhongcheng, Zhang Kunkun, et al. Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of the amphibolite from Paxialayidang area on the southern margin of Altun terrain[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1149–1164 (in Chinese with English abstract).

阿尔金南缘帕夏拉依档沟斜长角闪岩年代学、 地球化学及其构造意义

毕政家^{1,2,3} 曾忠诚² 张昆昆¹ 曹同礼¹ 刘德民¹ 陈 宁² 赵江林² 李 琦² 李德威¹

(1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710068;

3. 中铁工程设计咨询集团有限公司济南设计院, 山东 济南 250022)

摘要: 阿尔金造山带南缘帕夏拉依档沟零星发育一些斜长角闪岩, 主要呈透镜状或豆荚状产于阿尔金岩群大理岩中。文章对这些斜长角闪岩开展了岩相学、年代学以及地球化学方面的研究, 获得斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (857.4 ± 7.1) Ma 和 (432.5 ± 5) Ma, 前者代表其形成年龄, 后者代表其变质年龄。地球化学特征显示斜长角闪岩轻稀土微弱富集, 轻重稀土分异不显著, 并有部分消减带玄武岩地球化学特征, 源区为古俯冲带再循环的富集地幔源区, 并受到流体或熔体的改造。结合判别图解和区域构造演化, 分析得出斜长角闪岩原岩形成于初始裂谷环境, 是大陆拉张向裂谷转换机制下形成的过渡岩石类型, 较新年龄 (432.5 ± 5) Ma 为早志留世陆壳伸展和软流圈底辟作用引起的变质年龄。本次研究为新元古代中晚期阿尔金南缘基性岩浆活动提供了新的年代学和地球化学方面的证据, 这期基性岩浆活动可能为 Rodinia 超大陆初始裂解事件在阿尔金南缘的响应。

关键词: 斜长角闪岩; 帕夏拉依档; 初始裂谷; Rodinia 超大陆; 阿尔金南缘

中图分类号: P588.12⁺5; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)04-1149-16

Geochronology, geochemical characteristics and tectonic implications of the amphibolite from Paxialayidang area on the southern margin of Altun terrain

BI Zheng-jia^{1,2,3}, ZENG Zhong-cheng², ZHANG Kun-kun¹, CAO Tong-li¹, LIU De-min¹,
CHEN Ning², ZHAO Jiang-lin², LI Qi², LI De-wei¹

(1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. China Railway Engineering Consulting Group Co. Ltd. Jinan Design Institute, Jinan 250022, Shandong, China)

Abstract: Amphibolite is distributed sporadically in Paxialayidang area on the southern margin of Altun terrain. The amphibolite is ellipsoidal or lenticular in shape and is wrapped by marble of Altun terrain. In this paper, the authors studied petrology,

收稿日期: 2015-05-11; 改回日期: 2015-06-02

基金项目: 中国地质调查局项目(12120114081901)和油气资源与探测国家重点实验室开放基金(KFKT2010-5)联合资助。

作者简介: 毕政家, 男, 1988 年生, 硕士生, 构造地质学专业; E-mail: bizhengjia@163.com。

通讯作者: 刘德民, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事构造地质学方面的教学与科研工作; E-mail: metmo2014@163.com。

geochronology and geochemistry of the amphibolites. LA-ICPMS zircon U-Pb dating yielded ages of (432.5 ± 5) Ma and (857.4 ± 7.1) Ma for metamorphic event and protolith respectively, and shows that the protolith was formed during Neoproterozoic Qingbaikou period. Amphibolite is slightly enriched in REE, and shows unnoticeable fractionation between light rare earth elements (LREE) and heavy rare earth elements (HREE) and the signatures of subduction zone basalt. The primary magma originated from an enriched mantle source, which was formed by the recirculation of subducted slab, and was modified by fluid or melt subsequently. Combined with the evolution of regional tectonic, the authors hold that the protolith of amphibolite was formed in an incipient continental rift and was a transitional type formed during the transition from continental extension to continental rift. The younger age of (432.5 ± 5) Ma represents the time of metamorphic event, which was caused by the detachment of continental lower crust during Early Silurian. In this paper, the authors provide new geochronological and geochemical evidence about basic magmatic activity during middle-late stage of Neoproterozoic on the southern margin of Altun terrain. The basic magmatic activity was the response to the Rodinia supercontinent breakup on the southern margin of Altun terrain.

Key words: amphibolite; Paxialayidang; incipient continental rift; Rodinia supercontinent; southern margin of Altun terrain

About the first author: BI Zheng-jia, male, born in 1988, master, majors in structural geology; E-mail: bizhengjia@163.com.

About the corresponding author: LIU De-min, male, born in 1975, doctor, associate professor, engages in the teaching and scientific study of structural geology; E-mail: metmo2014@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program(No. 1212114081901)and State Key Laboratory Petroleum Resources and Prospecting Fund(No.KFKT2010-5).

阿尔金造山带位于青藏高原的北部边缘,是塔里木地块和柴达木地块的天然分界线。由于其特殊的构造位置,一些重要的构造线(如蛇绿岩带和高压—超高压变质带)都在此突然消失或者转变了方向。它是一个经历了多期复杂的构造演化,由不同的构造层次和形成于不同构造环境地质体组成的复合构造带,因此一直成为中外学者关注的焦点^[1-2]。前人对其大地构造属性存在不同的认识:张显庭等认为是早古生代造山带^[3]。葛肖虹等则提出为肢解的“西域板块”,是板块在晚白垩世—始新世相互作用的结果^[4]。整个地区长期以来被认为是塔里木地块的组成部分^[5-6]。随着地区研究程度的加深,前人对阿尔金地区构造单元的划分提出了新的方案,如校培喜等认为阿尔金山构造带由两带两块组成,自北向南分别为阿北地块、红柳沟—拉配泉蛇绿构造混杂岩带、阿中地块、清水泉—茫崖蛇绿构造混杂岩带^[7]。有些学者通过研究构造带内不同地质体的地质特征以及岩石学、地球化学和同位素等资料,将构造带划分为阿北变质地体、红柳沟—拉配泉构造混杂岩带、阿中米兰河—金雁山地块、阿南茫崖蛇绿构造混杂岩带四个构造单元^[8],刘永顺等根据不同的岩石组合和构造特征将阿尔金地区划分为敦煌地块、阿北蛇绿混杂岩带、阿尔金中—新元古代构造岩片、阿尔金构造杂岩带和阿南基性超

基性岩带5个构造单元^[9]。

近几年来,南阿尔金地区的研究主要集中在阿尔金高压—超高压变质带以及蛇绿混杂岩带,取得了显著的成果^[10-14]。相对于北阿尔金地区,南阿尔金地区的研究程度相对较低,仅仅局限于研究区的高压超高压变质带。前人在南阿尔金超高压变质锆石微区 LA-ICP-MS 定年获得核部年龄为 (754 ± 9) Ma, 并认为其原岩具有洋壳性质^[15], 表明南阿尔金以及柴北缘地区可能在 800~750 Ma 已经出现了洋壳,本地区在青白口纪晚期就出现了初始的裂谷或者是洋盆,那么研究区 Rodinia 超大陆最早初始裂解发生在何时呢? 笔者研究了阿尔金南部帕夏拉依档沟一带斜长角闪岩的岩石学、年代学以及地球化学特征,认为其可能为 Rodinia 超大陆初始裂解事件在阿尔金南缘的响应,为阿尔金造山带新元古代的构造演化提供了新的证据。

2 区域地质背景及岩石学特征

2.1 区域地质背景

研究区大地构造位置位于阿尔金造山带,以阿尔金南缘主断裂为界,进一步划分为阿中地块和阿南蛇绿构造混杂岩带2个二级构造单元^①。阿中地块出露地层主要为古元古界阿尔金岩群和青白口系索尔库里群,其中阿尔金岩群为基底变质岩系,

①王永和,校培喜,潘长利,等.新疆1:25万苏吾什杰幅区域地质调查报告[R].西安:西安地质矿产研究所.2003.

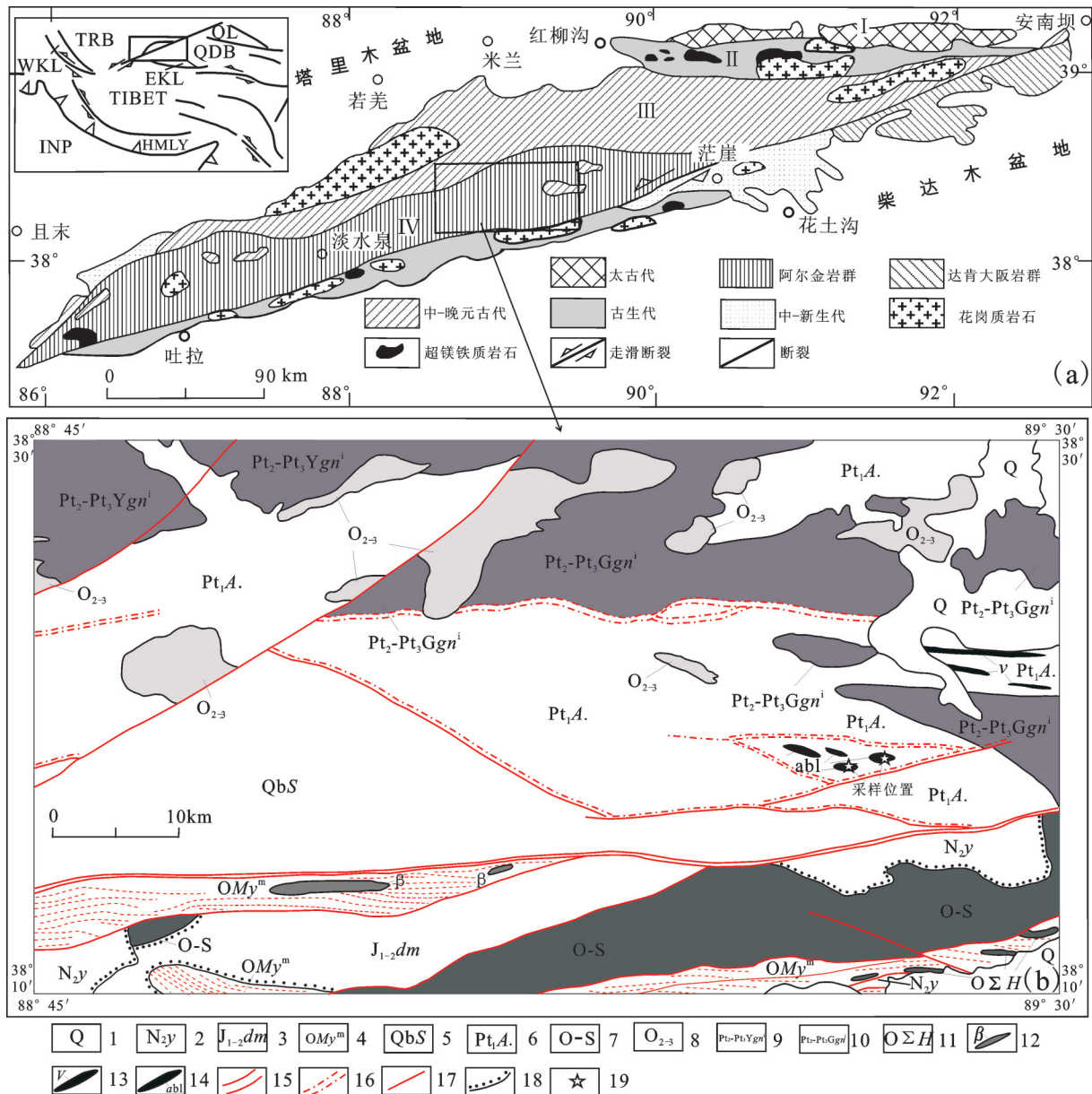


图1 研究区地质简图及采样位置

TRB—塔里木盆地; QL—祁连山; QDB—柴达木盆地; WKL—西昆仑; EKL—东昆仑; TIBET—西藏; HMLY—喜马拉雅山; INP—印度板块; I—阿北变质地块; II—红柳沟—拉配泉混杂岩带; III—米兰河—金雁山地块; IV—阿尔金南缘俯冲碰撞杂岩带; 1—第四系; 2—新近系油砂山组; 3—侏罗系大煤沟组; 4—奥陶纪茫崖蛇绿混杂岩; 5—青白口系索库库里群; 6—古元古代阿尔金岩群; 7—玉苏普阿勒塔格岩体; 8—帕夏拉依档岩体; 9—亚干布阳片麻岩; 10—盖里克片麻岩; 11—超基性岩块体; 12—玄武岩块体; 13—辉长岩脉; 14—斜长角闪岩; 15—区域大断裂; 16—韧性剪切带; 17—断层; 18—不整合界限; 19—采样位置

Fig.1 Simplified geological map of the study area and sampling sites

TRB—Tarim basin; QL—Qilian Mountains; QDB—Qaidam basin; WKL—West Kunlun; EKL—East Kunlun; TIBET—Tibet; INP—Indian plate; HMLY—The Himalayas; INP—Indian plate; I—Metamorphism plot of northern Altyn; II—Hongliugou—Lapeiquan melange; III—Milanhe—Jinyanshan plot; IV—Subduction collision complex zone of southern Altyn; 1—Quaternary; 2—Youshashan Formation; 3—Dameigou Group; 4—Mangya ophiolite melange; 5—Suoerkuliqun Group; 6—Aerjin Group; 7—Yusupualetage rock body; 8—Paxialayidang rock body; 9—Yaganbuyang gneiss; 10—Gailike gneiss; 11—Ultrabasic block; 12—Basalt block; 13—Gabbro dyke; 14—Amphibolite; 15—Regional fault; 16—Ductile shear zone; 17—Fault; 18—Unconformity; 19—Sampling location

原岩可能为一套浅海相碎屑岩-火山岩-碳酸盐岩建造,索尔库里群变质程度较低,为陆块边缘裂陷海盆碎屑岩-火山岩-碳酸盐岩建造。根据1:25万苏吾什杰幅区域地质调查报告成果^①,阿南蛇绿构造混杂岩带主要由奥陶纪蛇绿岩、蛇绿岩上覆岩系、外来岩片等构造块体和变形基质两部分组成,块体有蛇纹石化橄榄岩、辉长岩、玄武岩、硅质岩、黑云斜长片麻岩、白云质大理岩、变砂岩及含砾砂岩等,基质主要由构造片岩、劈理化细砂岩、板岩、凝灰岩等组成。同时研究区位于多个构造带交汇部位,岩浆活动较为频繁,主要有中新元古代变质侵入岩盖里克片麻岩和亚干布阳片麻岩,古生代基性-酸性侵入岩帕夏拉依档岩体和玉苏普阿勒克塔格岩体。中-新生代沉积盆地上叠于阿中地块和阿南蛇绿构造混杂岩带之上,其自下向上可分为中生代侏罗纪、新生代新近纪和第四纪3个时期不同类型的沉积建造,沉积地层分别为侏罗系大煤沟组、新近系油砂山组和第四系沉积物。

帕夏拉依档一带出露地层主要为阿尔金岩群,1:25万苏吾什杰幅区调^②在其中填绘了“帕夏拉依档上游变质岩片”,虽然没有在其中发现高压变质岩或高压变质的信息,但认为其具有类似的构造环境和相似的围岩性质。在《阿尔金地区1:5万J45E010020、J45E010021、J45E010022、J45E011020、J45E011021、J45E011022六幅区域地质矿产调查》项目的野外地质调查过程中,笔者对该岩片进行了详细的调查和研究,发现该岩片呈一长透镜体状近东西向分布。长约15 km,最宽处约2.5 km,面积约30 km²,岩片夹裹于阿尔金岩群的片麻岩中,四周以韧性断裂带与围岩接触,该岩片由基质岩石和构造透镜体组成形成“包含”结构,基质岩石主要为碳酸盐岩,而构造透镜体则全为斜长角闪岩,未发现超高压榴辉岩的存在,初步认为该岩片也是阿尔金岩群的组成部分,呈构造透镜体分布的斜长角闪岩为残留的基性岩墙,本文主要对这套斜长角闪岩开展岩石学、年代学以及地球化学方面的研究。

1.2 岩石学特征

本文样品采自阿尔金南部帕夏拉依档沟一带,大都呈透镜状或豆荚状产于阿尔金岩群的大理岩中(图2-a、2-b)。露头一般,表面为灰黑-灰绿

色,单个规模不大并且较为分散,大小为3 m×1.5 m~5 m×2 m,其透镜体长轴方向与区域上片麻理方向平行或者呈小角度斜交。由于后期构造运动的改造,局部可见透镜体被节理或小型的断层所切割。其围岩为大理岩,风化面为黄褐色,新鲜面为白色,具有粒状变晶结构(粒径为0.5~1.5 mm),块状构造,局部可见大理岩呈岩块状产出。

斜长角闪岩呈灰绿色,镜下显示为柱状粒状变晶结构,块状构造(图2-c、2-d)。主要矿物为角闪石(45%~65%)、斜长石(20%~35%)、石英(5%~15%)、黑云母(5%~10%),还有少量的绿泥石、绿帘石、铁质等,副矿物为锆石、磷灰石、磁铁矿等。其中角闪石粒度大小为0.23~1.11 mm,浅绿色、黄绿色,半自形柱状,晶体比较破碎,晶形不完整,具闪石式解理,次生绿泥石化、绿帘石化较强,析出铁质,弱定向排列,集晶形成条带。斜长石粒度大小为0.20~0.56 mm,呈半自形板条状、他形粒状,双晶不清楚,晶面比较浑浊,次生泥化、绢云母化、硅化较强,杂乱分布。岩石经历了变形,可见角闪石、斜长石和石英出现微弱的定向排列,据镜下观察和分析认为它们应属于同一个矿物共生组合,其变质程度相当于中温中压的角闪岩相,原岩可能为基性辉长岩。

2 样品分析方法

样品采集过程中,为保证样品的质量将其外侧削去,选取新鲜、纯净无脉体的岩石,并对其进行相关的分析测试和研究。

2.1 年代学分析方法

年龄样品用常规的磁选和重选技术得到锆石,在双目镜下挑选出无包裹体、无裂纹、透明度及晶型较好的锆石用于测年。将挑选出来的锆石颗粒黏在双面胶上,用无色透明的环氧树脂固定,然后对其表面进行抛光至锆石内部暴露。锆石反射光、透射光、阴极发光照相在西北大学扫描电镜加载阴极发光仪上完成。锆石U-Pb定年是在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,定年仪器为Shield Torch Agilent7500a型LA-ICP-MS;激光剥蚀系统为德国MicroLas公司生产的GeoLas200M,激光器为Lambda Physik公司的ComPex102 ArF(工作物质

①王永和,校培喜,潘长利,等.新疆1:25万苏吾什杰幅区域地质调查报告[R].西安:西安地质矿产研究所.2003.

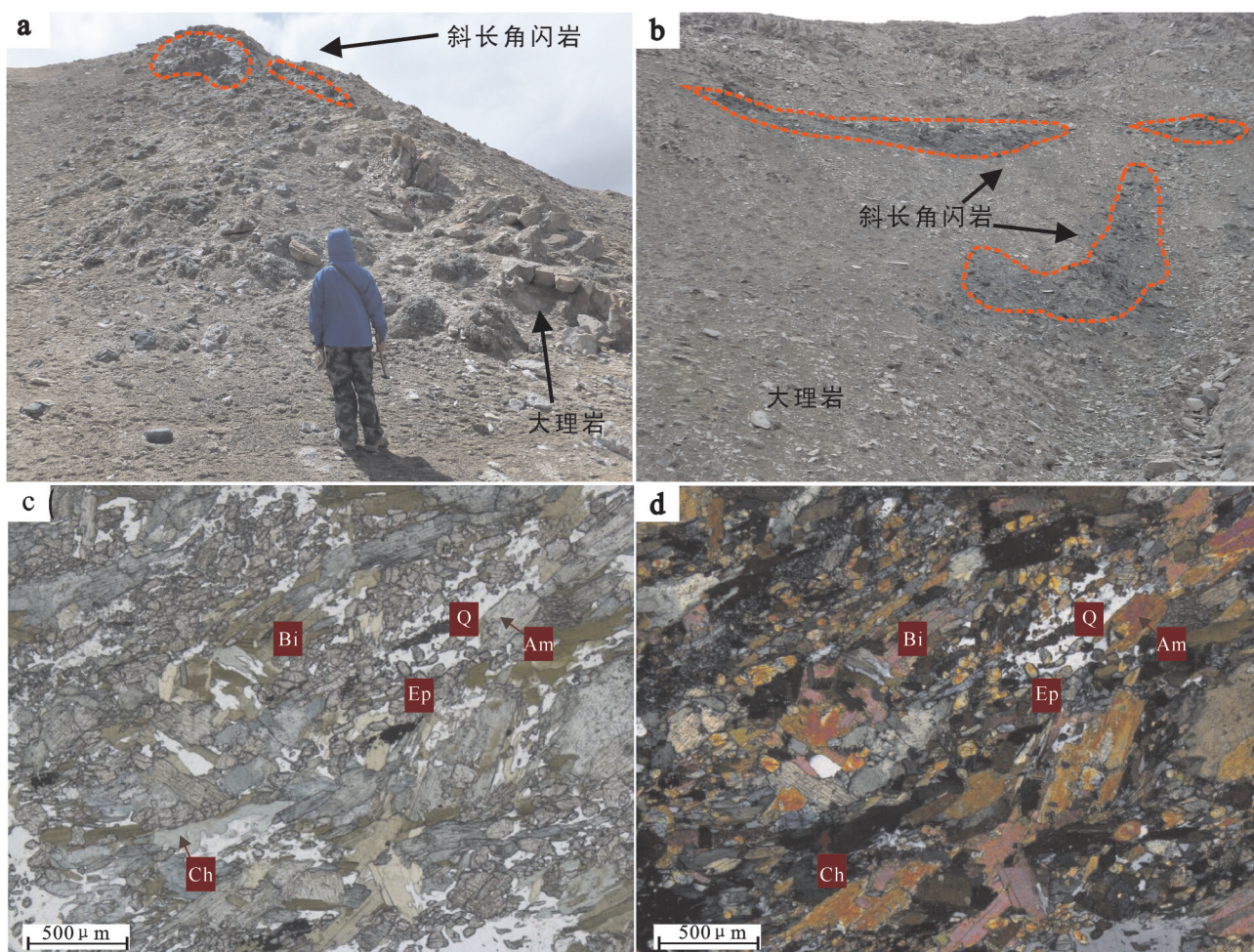


图2 斜长角闪岩野外及镜下特征

a,b—样品呈透镜状或豆荚状产出;c—单偏镜下斜长角闪岩;d—正交镜下斜长角闪岩

Q—石英;Am—角闪石;Ep—绿帘石;Ch—绿泥石;Bi—黑云母

Fig. 2 Photos of the outcrops and microscopic identification

a,b—Amphibolite in lenticular or podiform form in the open pit; c—Amphibolite (plainlight); d— Amphibolite (crossed nicols)

Q—Quartz; Am—Amphibole; Ep—Epidote; Ch—Chlorite; Bi—Biotite

ArF, 波长为 193 nm); 实验室采用 He 作为剥蚀物质的载气, 束斑直径为 30 μm , 剥蚀深度为 20~40 μm , 频率为 10 Hz; 方式为单点剥蚀, 每个分析点的气体背景采集时间为 30 s, 信号采集时间为 40 s; 用美国国家标准人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM 610 进行仪器最佳化调试, 数据采集选用质量峰采点的跳峰方式, 每完成 5 个待测样品测定, 插入测标样一次。年龄计算以国际标准锆石 91500 作为外部物质, 元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, 由于 SiO_2 在锆石中较为稳定, 采用 ^{29}Si 作为内标。数据处理采用 GLITTER (ver4.0, Macquarie

University) 程序, 采用 Isoplot3.0 程序^[16] 计算加权平均年龄并绘制谐和图, 所获得同位素比值和年龄误差都在 1σ 之内。详细的实验原理和过程以及所使用的仪器可参见文献袁洪林等^[17]。

2.2 主量、微量元素分析方法

所采集地球化学样品均在咸阳核工业 203 研究所分析测试中心分析完成。主量元素采用荷兰帕纳科制造的 AxiosX 射线光谱仪分析, 分析精度(相对标准差)一般小于 1%; 稀土元素用电感耦合等离子体质谱法(XSERIES2 型 ICP-MS)分析, 微量元素用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)分

析,两者的分析精度都优于5%。

3 锆石U-Pb年代学特征

本文对样品进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年代测定,共测了20个点。从锆石形态和阴极发光图像上来看(图3-b),锆石粒度和形态差别较大,多为不规则状,少量锆石可见后期形成的白色退变亮边,大部分呈灰-深灰色,可能与锆石中U、Th、REE等微量元素含量较多有关^[18]。锆石总体上可以分为2种类型。一种是岩浆锆石,呈短柱状一半浑圆状,粒径从60~150 μm 不等,长宽之比为3:1,可见明显的岩浆震荡环带,推测较宽的环带生长过程中由于较高的温度促使微量元素快速迁移所致。 $\text{Th}=58\times 10^{-6}\sim 579\times 10^{-6}$, $\text{U}=121\times 10^{-6}\sim 1961\times 10^{-6}$, Th/U 大部分比值介于0.40~0.67,暗示其为岩浆成因^[19]。另一种为变质锆石,半浑圆-浑圆状,可见明显的核边结构和扇形环带结构,少量呈阴暗明显的斑杂状,可能是由于锆石在变质重结晶过程中固态结晶速率不同造成的。第二类锆石U、Th含量与第一类锆石相比均较高,分别集中在 $\text{U}=298\times 10^{-6}\sim 640\times 10^{-6}$, $\text{Th}=123\times 10^{-6}\sim 229\times 10^{-6}$,其 Th/U 比值平均为0.46,比值与传统变质锆石有所差异^[20]。U-Pb年代学测试结果如表1和图3-a所示,可以看出所有的测点都集中在谐和线及其附近区域,说明锆石的成因较为单一。可以看到2个集中区域,其中9个测点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值介于853.6~861.3 Ma,加权平均年龄为 $(857.4\pm 7.1)\text{Ma}$ (MSWD=0.10),应该代表斜长角闪岩原岩的形成年龄。5个测点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年

龄值介于 $(430\pm 5.6)\text{Ma}\sim(435.2\pm 5.8)\text{Ma}$,加权平均年龄为 $(432.5\pm 5.0)\text{Ma}$ (MSWD=0.14),代表了后期的变质事件年龄。其中4号点位于残核上,年龄为 $(2237\pm 53.4)\text{Ma}$,代表了继承锆石年龄,可能来源于古元古代结晶基底。另外10号点和14号点年龄分别为 $(1511.6\pm 58.1)\text{Ma}$ 和 $(1571.6\pm 57.4)\text{Ma}$,可能来源于不同块体的年龄。12号点得出 $(363.7\pm 5)\text{Ma}$ 为后期构造事件年龄。19号点位于核边之间,年龄为 $(633\pm 2.1)\text{Ma}$,可能为残核与边部产生的混合年龄,没有实际地质意义。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素特征

样品地球化学测试分析见表2,6件斜长角闪岩主量元素含量较为稳定。 SiO_2 为46.50%~49.23%(平均47.59%)属于基性岩类, $\text{Al}_2\text{O}_3=14.08\%\sim 17.34\%$, $\text{TiO}_2=0.91\%\sim 1.17\%$,略低于大陆裂谷型火山岩含量。全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量0.88%~3.21%; K_2O 的平均值为0.51%, Na_2O 的平均值为2.07%, P_2O_5 和 MnO 的含量较低,均值分别为0.11%和0.22%。 $\text{MgO}=4.78\%\sim 8.83\%$,平均值为6.92%。 $\text{FeO}^{\text{T}}=9.75\%\sim 10.93\%$ (平均10.44%), $\text{Mg}^{\#}=49.6\sim 62.9$ (平均57.6), $\text{Mg}^{\#}$ 指数含量变化范围大。样品的烧失量不高(1.22%~2.29%),在变质作用过程中,挥发成分较低。在TAS图解上(图4-a)斜长角闪岩样品全部落在了亚碱性辉长岩范围内。在 $\text{Nb}/\text{Y}-\text{Zr}/\text{TiO}_2$ 图上(图4-b)大部分样品属于亚碱性玄武岩。综合分析认为样品原岩为基性辉长岩墙。

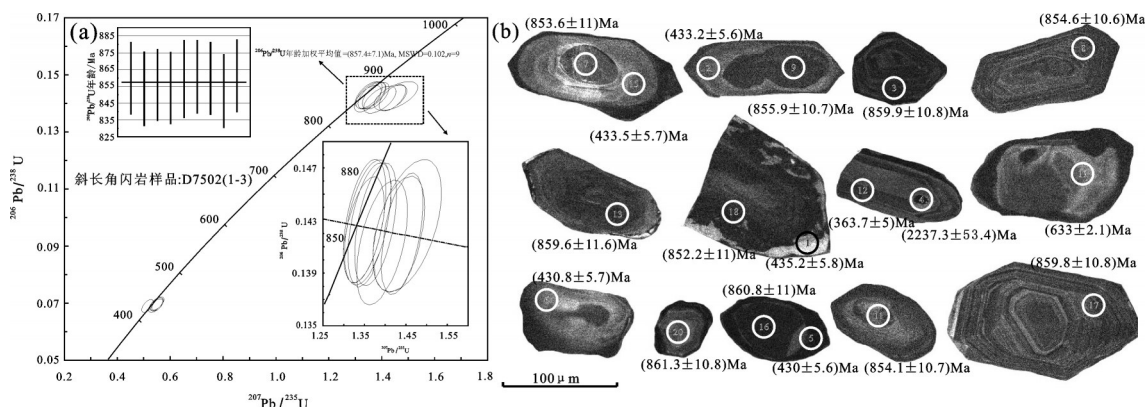


图3 斜长角闪岩U-Pb年龄谐和图(a)和部分锆石阴极发光图(b)

Fig. 3 U-Pb concordant diagram (a) of the zircons and CL images (a) from the plagioclase amphibolite

表1 帕夏拉依档斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb analytical results of zircon from amphibolite of the Paxialayidang area

测点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值				表面年龄/Ma			
	Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
D7502-1-01	55.31	299	584	0.51	0.00193	0.05712	0.00193	0.00193	0.00193	0.00193	0.00193	0.00193
D7502-1-02	51.61	227	640	0.35	0.00184	0.0576	0.00184	0.00184	0.00184	0.00184	0.00184	0.00184
D7502-1-03	106.29	333	582	0.57	0.00219	0.06996	0.00219	0.00219	0.00219	0.00219	0.00219	0.00219
D7502-1-04	40.10	87	85	1.02	0.00443	0.14082	0.00443	0.00443	0.00443	0.00443	0.00443	0.00443
D7502-1-05	41.75	422	459	0.92	0.00176	0.05407	0.00176	0.00176	0.00176	0.00176	0.00176	0.00176
D7502-1-06	74.08	128	1017	0.13	0.00198	0.05721	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198
D7502-1-07	178.75	418	1045	0.40	0.00245	0.07321	0.00245	0.00245	0.00245	0.00245	0.00245	0.00245
D7502-1-08	257.92	579	1366	0.42	0.00315	0.10188	0.00315	0.00315	0.00315	0.00315	0.00315	0.00315
D7502-1-09	294.38	289	1961	0.15	0.00229	0.07357	0.00229	0.00229	0.00229	0.00229	0.00229	0.00229
D7502-1-10	70.52	175	217	0.80	0.00296	0.09417	0.00296	0.00296	0.00296	0.00296	0.00296	0.00296
D7502-1-11	88.55	61	585	0.10	0.00219	0.06896	0.00219	0.00219	0.00219	0.00219	0.00219	0.00219
D7502-1-12	28.26	216	360	0.60	0.00207	0.05751	0.00207	0.00207	0.00207	0.00207	0.00207	0.00207
D7502-1-13	20.15	74	121	0.61	0.00269	0.07389	0.00269	0.00269	0.00269	0.00269	0.00269	0.00269
D7502-1-14	129.37	221	545	0.41	0.00304	0.09722	0.00304	0.00304	0.00304	0.00304	0.00304	0.00304
D7502-1-15	24.43	123	298	0.41	0.0019	0.05711	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019
D7502-1-16	60.69	143	334	0.43	0.00224	0.06892	0.00224	0.00224	0.00224	0.00224	0.00224	0.00224
D7502-1-17	77.63	208	482	0.43	0.00221	0.06926	0.00221	0.00221	0.00221	0.00221	0.00221	0.00221
D7502-1-18	191.35	732	1088	0.67	0.00237	0.07146	0.00237	0.00237	0.00237	0.00237	0.00237	0.00237
D7502-1-19	36.06	67	305	0.22	0.00203	0.06218	0.00203	0.00203	0.00203	0.00203	0.00203	0.00203
D7502-1-20	100.18	58	620	0.09	0.00219	0.06851	0.00219	0.00219	0.00219	0.00219	0.00219	0.00219

表2 帕夏拉依档斜长角闪岩主量元素(%)、微量元素(10^{-6})地球化学测试结果Table 2 Major (%) and trace elements (10^{-6}) concentrations of the amphibolite in Paxialayidang area

分析 项目	D7502-1	D7502-2	D7502-3	D7506-1	D7506-2	D7506-3	分析 项目	D7502-1	D7502-2	D7502-3	D7506-1	D7506-2	D7506-3
斜长角闪岩							斜长角闪岩						
SiO ₂	49.23	47.56	47.42	48.21	46.61	46.5	Ta	1.03	0.93	0.72	1.14	0.76	0.56
TiO ₂	0.91	1.17	1.06	1.17	1.02	1.01	Zr	66.80	95.50	87.00	72.50	83.70	87.00
Al ₂ O ₃	14.81	15.29	15.64	14.08	15.52	17.34	Hf	0.93	0.52	0.61	0.54	0.60	0.56
Fe ₂ O ₃	1.40	4.78	5.00	4.57	5.78	7.04	La	12.2	11.2	11.1	8.37	10.2	18.0
FeO	9.67	6.1	5.32	7.43	4.55	3.87	Ce	22.1	22.0	20.4	15.4	18.4	29.8
MnO	0.38	0.17	0.18	0.19	0.17	0.21	Pr	2.76	2.65	2.67	2.08	2.45	3.46
MgO	8.83	8.42	6.43	7.21	5.85	4.78	Nd	12.5	13.1	13.0	10.8	11.6	17.0
CaO	11.92	10.12	12.68	11.2	13.67	14.9	Sm	3.14	3.39	3.19	2.68	2.96	3.97
Na ₂ O	0.47	2.92	2.71	1.39	2.76	2.17	Eu	0.84	1.04	0.90	0.92	0.88	1.93
K ₂ O	0.41	0.24	0.28	1.37	0.45	0.28	Gd	3.35	3.71	3.46	3.51	3.70	4.71
P ₂ O ₅	0.1	0.13	0.12	0.08	0.09	0.11	Tb	0.53	0.64	0.60	0.54	0.54	0.71
Loi	0.62	2.28	2.29	1.96	2.82	1.22	Dy	3.67	4.40	4.24	4.01	4.01	4.95
Tol	98.75	99.18	99.13	98.86	99.29	99.43	Ho	0.64	0.82	0.74	0.75	0.72	0.85
Cr	587.20	452.20	367.40	217.90	369.90	334.10	Er	2.06	2.50	2.36	2.42	2.26	2.71
Co	52.70	40.60	36.10	47.40	37.60	27.40	Tm	0.28	0.32	0.28	0.32	0.29	0.33
Cu	13.90	38.50	43.60	153.20	37.20	31.30	Yb	1.79	2.10	1.99	2.25	2.01	2.20
Zn	142.80	92.40	77.50	90.50	70.00	64.30	Lu	0.28	0.29	0.27	0.28	0.24	0.32
Ni	125.00	76.20	65.50	84.60	71.00	56.40	Y	21.3	26.1	25.0	23.8	23.8	29.3
K	3404	1992	2324	11373	3736	2324	ΣREE	66.14	68.16	65.20	54.33	60.26	90.94
Rb	10.00	5.80	6.70	30.80	9.70	5.90	δEu	0.79	0.89	0.82	0.92	0.81	1.36
Cs	10.10	2.17	1.02	5.07	1.39	1.89	δCe	0.88	0.94	0.88	0.87	0.86	0.85
Sr	222.90	123.30	152.40	110.00	263.00	335.20	Fe ^T	10.93	10.40	9.82	11.54	9.75	10.20
Ba	39.70	58.10	69.90	207.20	114.30	74.10	Fe ₂ O ₃ ^T	12.1	11.6	10.9	12.8	10.8	11.3
Th	7.16	4.76	4.00	4.11	4.52	4.92	Mg [#]	62.9	62.9	57.9	56.7	55.7	49.6
U	0.83	0.69	0.87	1.41	0.95	0.84	(La/Yb) _N	4.60	3.60	3.76	2.51	3.42	5.52
V	257.10	239.30	242.50	283.60	244.30	222.80	(La/Sm) _N	2.44	2.08	2.19	1.96	2.17	2.85
Nb	8.70	7.94	24.50	7.21	7.36	5.20	(Gd/Yb) _N	1.51	1.43	1.40	1.26	1.49	1.73

4.2 稀土元素特征

样品的稀土总量(ΣREE)偏低,介于 $54.33 \times 10^{-6} \sim 68.16 \times 10^{-6}$, (La/Yb)_N比值主要介于2.51~3.60,轻重稀土分馏不强。(La/Sm)_N比值介于1.96~2.85, (Gd/Yb)_N比值介于1.26~1.73, δEu值变化介于0.79~0.92,说明原岩在形成过程中无明显的斜长石分离结晶作用^[23]。其δCe=0.85~0.94,样品没有遭受明显的氧化作用。在球粒陨石标准化配分图上,显示轻稀土微弱富集型的分配模式,配分曲线介于异常型洋中脊玄武岩(E-MORB)和洋岛玄武岩(OIB)之间,明显不同于轻重稀土分异较明显的洋岛玄武岩^[24],而与产生于大陆裂谷环境扬子西缘大红山群绿帘斜长角闪岩稀土配分模式相似^[25]。

4.3 微量元素特征

样品中K、Rb、Cs、Sr、Ba等大离子亲石元素受到后期变质事件影响容易发生迁移,含量变化范围

较大,所以在标准化微量元素蛛网图上和讨论部分并没有列出这些元素。从表2和图5-b中可以看出Nb含量大部分集中在 $5.20 \times 10^{-6} \sim 8.70 \times 10^{-6}$ (平均 7.28×10^{-6}), Ta= $0.56 \times 10^{-6} \sim 1.14 \times 10^{-6}$ (平均 0.86×10^{-6}), 相对于E-MORB(Nb、Ta分别为 8.30×10^{-6} 和 0.47×10^{-6})显示微弱的亏损^[23]。同时也可以看到显著的Pb富集和Hf亏损,微量元素蛛网图分布特征与岛弧基性岩(Nb、Ta、Zr、Hf等具有明显的负异常)有相似之处,但与OIB环境玄武岩(Nb、Ta、Ti正异常)显著不同^[26],在蛛网图还显示了具有部分地幔岩石圈信号埃塞俄比亚大陆裂谷玄武岩特征^[27]。

5 讨 论

5.1 岩体的成因

样品的Mg[#]变化范围在49.6~62.9,均小于原生玄武质岩石的标准值(约70)^[28],表明原岩在形成过

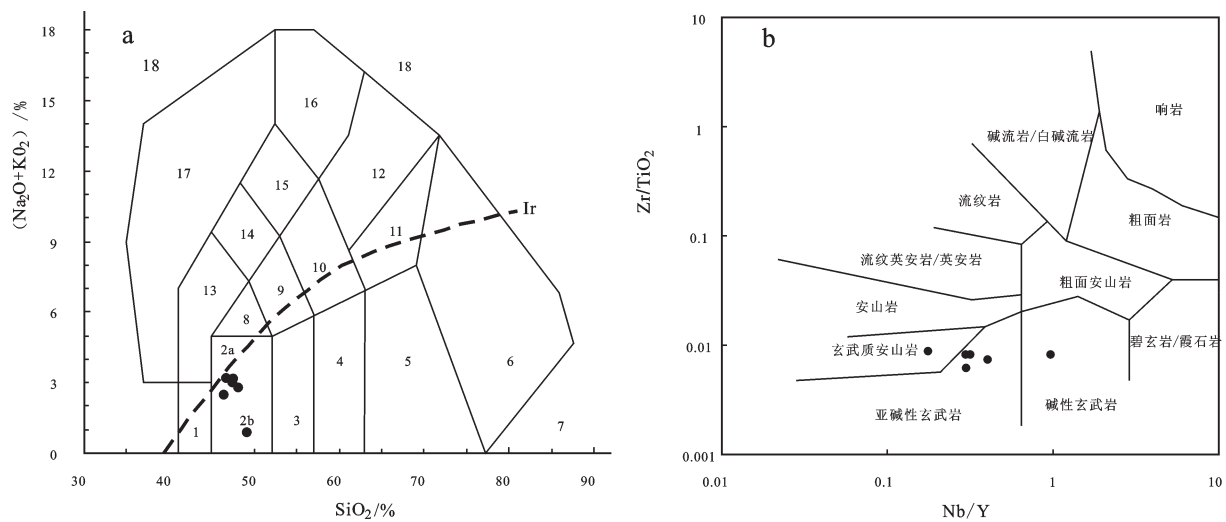


图4 斜长角闪岩的TAS图解(a,据文献[21])和Nb/Y-Zr/TiO₂图解(b,据文献[22])

Ir—Irvine 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性;1—橄榄辉长岩;2a—碱性辉长岩;2b—亚碱性辉长岩;3—辉长闪长岩;4—闪长岩;5—花岗闪长岩;6—花岗岩;7—石英岩;8—二长辉长岩;9—二长闪长岩;10—二长岩;11—石英二长岩;12—正长岩;13—副长石辉长岩;14—副长石二长闪长岩;15—副长石二长正长岩;16—副长正长岩;17—副长深成岩;18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

Fig. 4 TAS diagram (a) and Nb/Y versus Zr/TiO₂ diagram of the Plagioclase amphibolites (b)

Ir—Irvine dividing line, The upper part is alkaline and the lower is sub-alkaline; 1—Olivine gabbro; 2a—Alkaline gabbro; 2b—Sub-alkaline gabbro; 3—Gabbro-diorite; 4—Diorite; 5—Granodiorite; 6—Granite; 7—Quartzolite; 8—Monzogabbro; 9—Monzodiorite; 10—Monzonite; 11—Adamellite; 12—Syenite; 13—Foid-gabbro; 14—Foid-monzodiorite; 15—Foid-monzosyenite; 16—Foid-syenite; 17—Foid-plutonite; 18—Beloeilite/urtite/italite

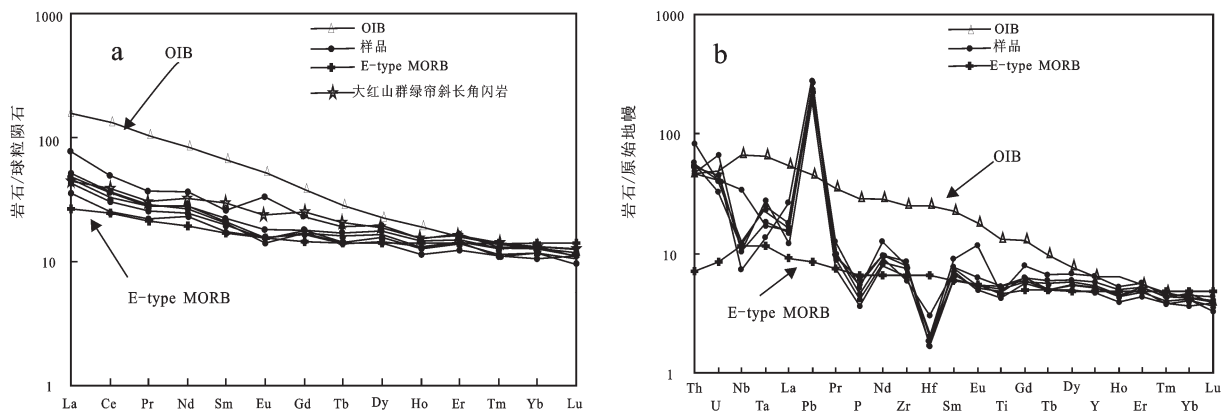


图5 斜长角闪岩球粒陨石标准化稀土配分图解(a)和原始地幔标准化微量元素配分图解(b)^[24]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle-normalized trace element diagram (b)^[24]

程中经历了岩浆不同程度的演化^[29]。其中 δEu 值集中在0.79~0.92,说明玄武质岩浆在上涌过程中出现微量斜长石分离结晶作用^[26]。但从表2可见 $\text{Mg}^\#$ 与主要氧化物之间没有明显的规律性变化,表示其结晶程度较弱,仅发生了镁铁质矿物(如橄榄石、辉石)以及斜长石的微弱分离结晶作用。同时Co和Cr随着MgO含量降低而降低,呈正相关关系,Ni与MgO的线性关系不强,进一步说明分离结晶作用相

对较弱。样品的 Al_2O_3 含量相对较高,可能是由于辉石的分离结晶造成Fe的亏损和Al的富集或者地幔橄榄岩部分熔融经历了后期俯冲作用的改造^[30]。

从蛛网图上可以看到各个样品的曲线分布相近,显示其相似的地球化学行为,具有共同的源区性质。微量元素Th/Ta比值可以作为基性岩在形成过程中发生同化混染的有效指标^[24],本次测试样品主要集中在5.11~6.95,介于原始地幔(2.3)和大陆地

壳(10)之间,说明岩浆上升侵位过程中可能受到围岩或者是地壳物质的影响。原始地幔的La/Nb比值约为1^[31],OIB比值小于1,因受陆壳污染的影响大陆溢流玄武岩的比值一般介于0.5~7.0^[32]。所测试的6个样品大部分为1.16~1.46>1,暗示可能有地壳物质的加入,但轻稀土元素微弱富集并与SiO₂之间没有明显的线性关系,说明岩浆上升过程中停留时间较短,地壳混染程度弱。Woodhead等指出岩浆在结晶分异、同化混染及液态分离过程中,不同源区Nb/U比值差别较大,大陆地壳约为12,OIB-MORB源区比值在47左右^[33],本次测试样品的比值集中在5.11~10.48,比大陆地壳的比值还要低。同时Zr/Hf比值(平均137.87)远大于大陆地壳和原始地幔的比值^[31],由于源区可能受到了俯冲流体交代作用的影响,如Zr相对于Hf易被淋滤带出,并在交代溶液形成的钠长石中沉淀形成再生锆石,具有很高的Zr/Hf比值(最大值可达到190)。在微量元素蛛网图上Nb、Hf、Ti等元素出现了亏损,具有部分俯冲消减带玄武岩地球化学特征,由于其地壳物质混染程度小,说明其源区可能受到了俯冲板片产生流体/熔体的影响。

高场强元素Zr/Nb比值集中在7.68~12.03,低于原始地幔的平均值(14.8),表明岩浆可能来自于某种过渡型或者富集型地幔源区。同时在Ta/Yb-Th/Yb图解上(图略)^[32]所有的样品都靠近E-MORB和WPB区域,均显示富集地幔的地球化学背景。Huang等研究表明源于软流圈地幔玄武岩和岩石圈地幔玄武岩La/Nb、La/Ta比值截然相反,前者La/Nb约小于1.5,La/Ta约小于22^[34]。样品的La/Nb比值为1.16~1.40,La/Ta=7.43~15.41,在软流圈玄武岩范围之内,通过Ce/Yb-Yb比值^[34]分析得出源区物质熔融程度大约为6%~11%。由分析可知岩浆可能起源于弱亏损的软流圈地幔,并受到了俯冲流体/熔体的影响形成富集的软流圈地幔,且经历了一定程度的部分熔融。

5.2 形成环境

样品的TiO₂质量分数为0.91%~1.17%(平均1.06%),较活动大陆边缘玄武岩(0.85%)要高,介于岛弧火山岩(0.58%~0.85%)和MORB型拉斑玄武岩(1.5%)之间^[35]。通常情况下大洋岛弧玄武岩Nb的含量小于 2×10^{-6} ^[27],本文样品Nb含量全部高于 $2 \times$

10^{-6} ,表明其可能并非直接形成于大洋岛弧环境。当MgO含量高于6%时,全铁的含量可以反映其形成的深度,含量和深度呈相关关系^[36],由表2可知样品MgO含量均高于6%,全铁含量介于9.75%~11.54%,低于现代岛弧和弧后盆地的含量,表明并非形成于岛弧或弧后盆地环境。同时样品相容元素Ni和Cr含量变化明显,明显低于Wilson给出的原始岩浆值,而与板内玄武岩含量相近,说明岩石可能形成于板内构造环境。

考虑到样品形成时代久远,可能经历后期多次构造热事件和变质作用的影响,其主要元素以及大离子亲石元素不能很好地揭示其形成的构造环境。可以用在风化、热液蚀变和角闪岩相变质作用过程中不易迁移的高场强元素、过渡元素来判别,例如夏林圻等认为地壳混染对Zr、Y等元素影响不大^[37],在Zr/Y-Zr图解上有3个样品落在了板内玄武岩(WPB)区域,另外3个样品落在了洋中脊玄武岩和火山弧玄武岩结合处(图6-b)。微量元素Cr-Y图解上样品全部落在了板内玄武岩(WPB)和洋中脊玄武岩(MORB)结合区(图6-a)。Nb/Zr-Th/Zr图解上^[38]全部的样品落在了大陆板内环境内(图6-c),其中大部分样品在大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区内。笔者根据Agrawal提出的参数组合^[39]编写了程序进行了相关计算和投图得出了样品既有火山弧玄武岩特征也具有大陆裂谷玄武岩特征。通过分析构造环境图解和区域演化资料得出其形成于陆内伸展的构造环境,但样品还显示了消减带玄武岩特征,说明源区演化与俯冲板片派生的富水流体交代地幔楔有关,即地幔源区发生了俯冲交代富集作用。

5.3 大地构造意义

基性岩墙群是一种特殊的构造岩石类型,可以作为岩石圈(或地壳)伸展事件的重要标志^[40],对于古地块的恢复再造具有重要意义。笔者通过野外地质调查发现斜长角闪岩呈透镜状或豆荚状广泛分布于阿尔金岩群中,通过对帕夏拉依档斜长角闪岩镜下鉴定以及综合分析推测其为辉长岩墙,它为基性岩墙群的一个分支且与Rodinia超大陆裂解事件有重要的关系。通过LA-ICP-MS锆石U-Pb定年得出了2期较为集中的年龄(857.4 ± 7.1) Ma和(432.5 ± 5.0) Ma。前者为大陆初始裂谷环境下基性

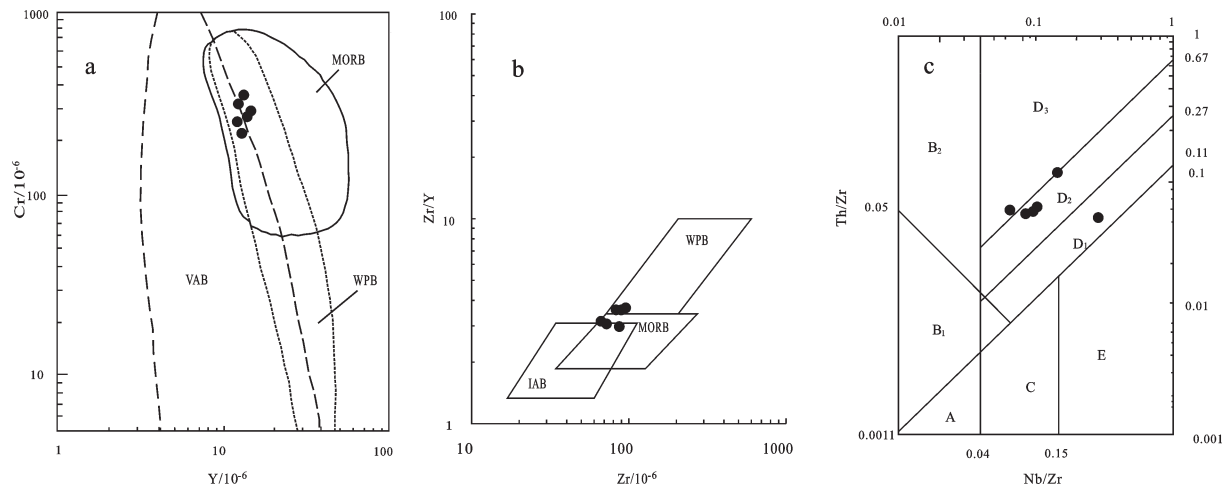


图6 斜长角闪岩不活动元素构造环境判别图解

a—玄武岩的Cr—Y判别图解据文献[37]; VAB—火山弧玄武岩, WPB—板内玄武岩, MORB—大洋中脊玄武岩; b—玄武岩Zr—Zr/Y判别图解据文献[37], IAB—岛弧玄武岩; MORB—大洋中脊玄武岩; WPB—板内玄武岩; c—玄武岩Nb/Zr—Th/Zr判别图解据文献[38], A—大洋板块发散边缘N—MORB区; B₁—大洋岛弧玄武岩区; B₂—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区; C—大洋板内区; D₁—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; D₂—大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区; D₃—陆—陆碰撞带玄武岩区; E—地幔热柱玄武岩区

Fig.6 Immobile trace element tectonic discrimination diagrams of plagioclase amphibolite

a—Cr—Y tectonic discrimination diagrams for the basalt; VAB—Volcanic arc basalts; WPB—Intraplate basalt; MORB—Mid ocean ridge basalt; b—Zr—Zr/Y, IAB=Island arc basalts; WPB—Intraplate basalt; MORB—Mid ocean ridge basalt; c—Nb/Zr—Th/Zr. A—Margin of divergent ocean; B₁—Island arc of continental margin; B₂—Volcanic arc of continental margin; C—Oceanic intraplate; D₁—Continental rift; D₂—Tentional zone; D₃—Collision zone of two continental plates; E—Mantle plume

岩墙群的成岩年龄,本研究将阿尔金南缘地区大陆初始裂解时间限定在青白口纪晚期;后者为后期构造热事件的年龄。

Rodinia 超大陆的汇聚以及相应的后期造山事件始于 1300 Ma,到 900 Ma 左右结束^[41], 1050~900 Ma 塔里木地块作为 Rodinia 超大陆的一部分可能记录了超大陆的汇聚过程^[42]。近几年在研究区周缘发现了较多关于超大陆汇聚事件的记录,例如北山柳园获得陆陆碰撞型花岗质岩石形成年龄为 880 Ma^[43],阿尔金南缘江孜勒萨依一带榴辉岩围岩中得到花岗质片麻岩为碰撞型花岗岩,原岩加权平均年龄为(923±13) Ma^[44]。王立社等在阿尔金中段环形山也发现年龄为(928±9) Ma 同碰撞汇聚构造地质背景下花岗岩^[45]。北山榴辉岩原岩在新元古代(约 900 Ma)经历了较高级的变质作用,同时北山柳园榴辉岩的围岩花岗质片麻岩原岩形成于(902±5) Ma,具有后碰撞花岗岩地球化学特征^[46]。前人在阿尔金及其周缘地区发现较多的碰撞型或碰撞后花岗质片麻岩,其形成的构造背景大多与超大陆的汇聚有关^[47]。本项目组在帕夏拉依沟北部采集了盖

里克片麻岩,并对其进行了详细的年代学研究得出原岩形成年龄为 886 Ma,并具有碰撞型花岗岩地球化学特征^[48],进一步说明了采样区基性岩墙(857.4±7.1) Ma 形成于 Rodinia 超大陆形成之后的初始裂解阶段,地壳处于伸展的构造环境,软流圈物质上涌,岩石圈被拉伸减薄,形成基性岩墙群。由于研究区处于多个构造带交汇部位,受到后期多次构造运动的影响,岩墙大都呈透镜状不连续的产于整个阿尔金岩群中。

Rodinia 超大陆在 800 Ma 左右的裂解是新元古代全球重大构造地质事件,此次裂解事件主要驱动力是地幔柱^[49-50]。但陆块之间的汇聚和裂解并不是等时的,往往出现穿时性。阿尔金—祁连—昆仑造山带发现了许多关于新元古代超大陆裂解事件的信息,如西昆仑元古代初期双峰式岩浆岩组合^[47],裂谷峰期裂解事件双峰式侵入杂岩(783±10) Ma、铁克里克凝灰岩(787±1) Ma 以及共生的大陆溢流玄武岩^[51]。北祁连片麻状花岗岩(776±10) Ma 和片麻状石英闪长岩(774±23) Ma^[52],吊大阪花岗质片麻岩(757±8) Ma 都记录了超大陆裂解事件的岩浆活

动^[47]。北阿尔金恰什坎萨伊沟南口青白口纪出现双峰式火山岩,其中大陆裂解峰期的岩浆流纹岩喷发年龄为 $(749.8 \pm 4.6) \text{ Ma}$ ^[53]。北阿尔金东段半鄂博图辉长岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $(829 \pm 60) \text{ Ma}$ ^[54]可能代表了北阿尔金陆内初始裂解阶段。阿尔金、祁连和昆仑造山带构造演化具有很强的同步性,它们在早古生代作为一个整体受控于原特提斯洋的构造演化^[55],原特提斯的扩张可能与其北侧始特提斯(阿尔金—昆仑元古洋)的消减有时空的关系和成因的联系^[56]。但柴北缘以及本文所研究的南阿尔金地区新元古代构造演化特别是超大陆裂解时间并不完全一致,锡铁山榴辉岩原岩年龄在 $800 \sim 750 \text{ Ma}$ ^[57];杨经绥等已经厘定出该时间段具有洋盆性质的蛇绿岩套组合 $(768 \pm 39) \text{ Ma}$,且 Nd 同位素特征与现代洋中脊玄武岩相近,其原岩可能为海底玄武岩^[58],进一步说明此时柴北缘已经出现了拉开的洋盆。南阿尔金超高压变质岩核部年龄为 $(754 \pm 9) \text{ Ma}$ 并且原岩也具有洋壳性质^[15]。总结上述资料分析得出,北阿尔金—祁连地区在 750 Ma 左右仍可能处于大陆裂谷的演化时期,而 $750 \sim 800 \text{ Ma}$ 柴北缘以及南阿尔金地区已经出现洋壳,进而说明南北阿尔金洋的汇聚以及裂解时间的不等性,南阿尔金地区的裂解可能在 800 Ma 以前,甚至更老。本文得出的第一组年龄为 $(857.4 \pm 7.1) \text{ Ma}$,形成于陆内演化时期的初始裂谷阶段,可能为南阿尔金地区大陆拉张向初始裂谷转换体制下形成的过渡型岩石类型。

本文斜长角闪岩另一组年龄数据为 $(432.5 \pm 5.0) \text{ Ma}$,为后期构造热事件造成的变质年龄。这一观点得到了区域演化资料的支持,例如在茫崖地区形成于活动大陆边缘的岛弧环境角闪辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 $(444.9 \pm 1.3) \text{ Ma}$ ^[14],阔什布拉克俯冲型花岗岩体年龄为 $(443 \pm 11) \text{ Ma}$ ^[59],巴什考供盆地南缘形成于碰撞—碰撞后环境的花岗质杂岩体年龄分别为 $(434.5 \pm 3.8) \text{ Ma}$ 和 $(431.1 \pm 3.8) \text{ Ma}$ ^[60],本文得到的年龄在上述范围之内,可能受同一事件的影响。但前人得到柴北缘鱼卡河榴辉岩变质年龄为 $(436 \pm 3) \text{ Ma}$ 和 $(431 \pm 4) \text{ Ma}$,围岩变质年龄 $(436 \pm 3) \text{ Ma}$ 和 $(432 \pm 19) \text{ Ma}$,榴辉岩及其围岩变质年龄较为一致,并认为是受大陆深俯冲作用的影响^[61]。Song et al. 对都兰超高压岩片提出了 460 Ma 洋壳俯冲到陆壳深俯冲 $((423 \pm 7) \text{ Ma})$ 模式^[62]。那么本次测试得出的

变质年龄与哪期构造事件有关呢?阿尔金南缘帕夏拉依档沟地区在区域上更加靠近茫崖地区以及巴什考供盆地,本次变质事件可能受到了洋陆转换之后陆壳伸展和软流圈底辟作用的影响。

6 结 论

本文通过对阿尔金南缘帕夏拉依档沟斜长角闪岩野外地质调查以及岩相学观察,并结合区域大地构造演化进行了详细的年代学和地球化学研究得出了如下结论:

(1)帕夏拉依档沟斜长角闪岩属于亚碱性辉长岩类,是基性岩墙群残片。原岩形成于 $(857.4 \pm 7.1) \text{ Ma}$,为基性岩浆活动侵位时间。后期变质年龄 $(432.5 \pm 5.0) \text{ Ma}$ 为洋陆转换后陆壳伸展和软流圈底辟,幔源岩浆发生底侵,形成的一次构造热事件。

(2)斜长角闪岩稀土元素轻重稀土分异不显著,微弱轻稀土富集和 Eu 负异常。同时微量元素蛛网图上显示部分俯冲消减玄武岩特征,源区为受到了俯冲流体或熔体改造的富集的软流圈地幔。

(3)综合分析斜长角闪岩地球化学特征和区域大地构造演化认为原岩形成于初始裂谷环境,是在大陆拉张向裂谷转换体制下形成的过渡岩石类型。进一步证明了阿尔金南缘地区新元古代中晚期与大陆裂解有关岩浆活动的存在,是 Rodinia 超大陆初始裂解事件在阿尔金南缘地区的响应。

致谢:本稿在成文过程中,匿名评审专家和编辑部的老师给出了建设性的审稿意见,中国地质大学(武汉)续海金老师、吴元保老师和西安地调中心的专家也提出了指导性建议,笔者在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- [1] 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. 地质学报, 1999, 73(3): 193–205.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, et al. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing[J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(3): 193–205(in Chinese with English abstract).
- [2] 覃小锋, 李江, 陆济璞, 等. 阿尔金碰撞造山带西段的构造特征[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 104–112.
Qin Xiaofeng, Li Jiang, Lu Jipu, et al. The structural characteristics in the western part of Altyn collision orogenic belt[J]. Geological

- Bulletin of China, 2006, 25(1/2): 104–112(in Chinese with English abstract).
- [3] 张显庭, 郑健康, 苟金, 等. 阿尔金东段槽型晚奥陶世地层的发现及其构造意义[J]. 地质论评, 1984, 30(2): 184–186.
- Zhang Xianting, Zheng Jiankang, Gou Jin, et al. The discovery of late Ordovician strata of geosynclinal type in the eastern segment of the altun mountains and their tectonic implications[J]. Geological Review, 1984, 30(2): 184–186(in Chinese with English abstract).
- [4] 葛肖虹, 刘俊来. 北祁连山带的形成与背景[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 222–229.
- Ge Xiaohong, Liu Junlai. Formation and tectonic background of the Northern Qilian orogenic belt[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 222–229(in Chinese with English abstract).
- [5] 程裕淇. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- Cheng Yuqi. Regional Geological Survey China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994(in Chinese).
- [6] 伍跃中. 阿尔金山的构造归属及其构造运动特征[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(2): 111–117.
- Wu Yuezhong. Tectonic attribution and movement characteristic of Altyn Mountain[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(2): 111–117(in Chinese with English abstract).
- [7] 校培喜, 张海泉, 王永和, 等. 阿中地块南缘晚元古代火山岩地质特征及构造环境分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(5): 461–466.
- Xiao Peixi, Zhang Haiquan, Wang Yonghe, et al. Analysis of geological feature and tectonic environment for Neoproterozoic volcanic rocks in southern margin of Middle Altun Plot[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(5): 461–466(in Chinese with English abstract).
- [8] 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 1999, 15(1): 57–64.
- Liu Liang, Che Zicheng, Wang Yan, et al. Characteristics and tectonic significance of high-pressure metamorphic belt Altun[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(1): 57–64(in Chinese with English abstract).
- [9] 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 等. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件[J]. 地质通报, 2009, 28(10): 1430–1438.
- Liu Yongshun, Yu Haifeng, Xin Houtian, et al. Altun tectonic unit division and the Precambrian important geological events[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(10): 1430–1438(in Chinese with English abstract).
- [10] 张建新, 孟繁聪, Mattinson C G. 南阿尔金—柴北缘高压—超高压变质带研究进展、问题及挑战[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 526–545.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Mattinson C G. Progress, controversies and challenge of studies on south Altyn Tagh–North Qaidam HP/UHP metamorphic belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 526–545(in Chinese with English abstract).
- [11] 刘良, 陈丹玲, 王超, 等. 阿尔金、柴北缘与北秦岭高压—超高压岩石年代学研究进展及其构造地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 472–479.
- Liu Liang, Chen Danling, Wang Chao, et al. New progress on geochronology of high-pressure/ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the South Altyn Tagh, the North Qaidam and the North Qinling orogenic belt, NW China and their geological significance[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2009, 39(3): 472–479(in Chinese with English abstract).
- [12] 刘永顺, 于海峰, 修群业, 等. 南阿尔金地区榴辉岩特征及意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 39(2): 166–174.
- Liu Yongshun, Yu Haifeng, Xiu Qunye, et al. Characteristics and tectonic implications of eclogites in southern Altun area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 39(2): 166–174(in Chinese with English abstract).
- [13] 曹玉亭, 刘良, 王超, 等. 阿尔金南缘塔特勒克布拉克花岗岩的地球化学特征、锆石 U–Pb 定年及 Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3259–3271.
- Cao Yuting, Liu Liang, Wang Chao, et al. Granite geochemical characteristics, zircon U–Pb dating and Hf isotope composition at Tatelekebulake in the South of Altun[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11): 3259–3271(in Chinese with English abstract).
- [14] 董增产, 校培喜, 奚仁刚, 等. 阿尔金南缘构造混杂岩带中角闪辉长岩地球化学特征及同位素测年[J]. 地质论评, 2011, 57(2): 307–216.
- Dong Zengchan, Xiao Peixi, Xi Rengang, et al. Geochemical characteristics and isotopic dating of bojites in the tectonic melange belt on south margin of Altun[J]. Geological Review, 2011, 57(2): 307–216(in Chinese with English abstract).
- [15] 刘良, 张安达, 陈丹玲, 等. 阿尔金江杂勒萨依榴辉岩和围岩锆石 LA–ICP–MS 微区原位定年及其地质意义[J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 98–107.
- Liu Liang, Zhang Anda, Chen Danling, et al. Implications based on LA–ICP–MS zircon U–Pb ages of eclogite and its country rock from Jianggalesayi area, Altyn Tagh[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(1): 98–107(in Chinese with English abstract).
- [16] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.0: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronological Center, Special Publication, 2003, 4: 1–71.
- [17] 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U–Pb 测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1511–1520.

- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, et al. Cenozoic intrusive laser probe zircon U–Pb and rare earth element composition analysis determination in Northeast[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1511–1520(in Chinese).
- [18] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U–Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589–1604.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Zircon minerageny and its restriction on interpretation of U–Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589–1604(in Chinese).
- [19] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid–state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 423–439.
- [20] Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U–Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps[J]. Cathodoluminescence in Geoscience, Springer–Verlag Berlin Heidelberg, Germany. 2000: 373–400.
- [21] Le Bas B M, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27: 745–750.
- [22] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325–343.
- [23] Woodhead J D. The origin of geochemical variations in Mariana lavas: A general model for petrogenesis in Intra–Oceanic Island Arcs? [J]. Journal of Petrology, 1988, 29(4): 805–830.
- [24] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313–345.
- [25] 杨红, 刘平华, 孟恩, 等. 扬子地块西南缘大红山群变质基性岩的地球化学研究及构造意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(10): 3021–3033.
- Yang Hong, Liu Pinghua, Meng En, et al. Geochemistry and tectonic significance for metabasite in the Dahongshan Group at the western margin of the Yangtze Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(10): 3021–3033(in Chinese with English abstract).
- [26] McCulloch M T, Gamble J A. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 102(3–4): 358–374.
- [27] Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 1995, 23: 251–286.
- [28] Dupuy C, Dostal J. Trace element geochemistry of some continental tholeiites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 67(1): 61–69.
- [29] 付国民, 苏建平, 胡能高, 等. 祁连山西段古元古代北大河岩群中斜长角闪岩的地球化学特征及构造背景[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 541–547.
- Fu Guomin, Su Jianping, Hu Nenggao, et al. Geochemistry and tectonic setting of amphibolites in the Paleoproterozoic Beidahe Group– complex in the western segment of the Qilian Mountains[J]. Geology in China, 2005, 32(4): 541–547(in Chinese with English abstract).
- [30] Hawkesworth C, Turner S, Gallagher K, et al. Calc–alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the Basin and Range[J]. Geophys Research, 1995, 100(B6): 10271–10286.
- [31] Weaver B L. The origin of oceanic basalt end–member compositions: Trace element and isotopic constraints[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 104(2–4): 381–397.
- [32] Wilson M. Igneous petrogenesis, London: Unwin Hyman, 1989: 1–466.
- [33] 张招崇, 肖序常, 王军, 等. 西昆仑山普鲁新生代火山岩中包体的发现及其地质意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(4): 386–390.
- Zhang Zhaochong, Xiao Xuchang, Wang Jun, et al. Discovery of Enclaves from Cenozoic Pulu Volcanic Rocks of West Kunlun Mountains and Their Geological Implications[J]. Earth Science——(Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(4): 386–390(in Chinese with English abstract).
- [34] Woodhead J D, McCullon M T. Ancient seafloor signals in Pitcairn Island lavas and evidence for large amplitude, small lengthscale mantle heterogeneities[J]. Earth Planetary Sci Lett, 1989, 94(3): 257–273.
- [35] Pearce J A. Role of the sub–continental lithosphere in magma genesis at active continental margin[C] // Hawkesworth C J and Norry M J. Continental Basalts and Mantle Xenoliths, 1983: 230–272.
- [36] Huang Y, Hawkesworth C, Smith I, et al. Geochemistry of late Cenozoic basaltic volcanism in Northland and Coromandel, New Zealand: Implications for mantle enrichment processes[J]. Chemical Geology, 2000, 164(15): 219–238.
- [37] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 77–89.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi et al. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(1): 77–89(in Chinese with English abstract).
- [38] 孙书勤, 汪云亮, 张成江. 玄武岩类岩石大地构造环境的Th、Nb、Zr判别[J]. 地质论评, 2003, 49(1): 40–47.
- Sun Shuqin, Wang Yunliang, Zhang Chengjiang. Discrimination of the tectonic settings of basalts by Th, Nb and Zr [J]. Geological

- Review, 2003, 49(1): 40–47(in Chinese with English abstract).
- [39] Agrawal S, Guevara M, Verma S P. Tectonic discrimination of basic and ultrabasic volcanic rocks through log– transformed ratios of immobile trace elements[J]. *International Geology Review*, 2008, 50(12): 1057–1079.
- [40] 李江海, 钱祥麟, 翟明国. 华北北部麻粒岩相带构造区划及其早前寒武纪构造演化[J]. *地质科学*, 1997, 32(3): 224–226.
Li Jianghai, Qian Xianglin, Zhai Mingguo. The tectonic division of north China Granulite facies belt and its early Precambrian tectonic evolution[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1997, 32(3): 224–226(in Chinese with English abstract).
- [41] Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration and break– up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1/2): 179–210.
- [42] Lu S N, Li H K, Zhang C L, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1–2): 94–107.
- [43] 梅华林, 李惠民, 陆松年, 等. 甘肃柳园地区花岗岩时代及成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 1999, 18(1): 14–17.
Mei Hualin, Li Huimin, Lu Songnian, et al. The age and origin of the Liuyuan granitoid, northwestern Gansu[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1999, 18(1): 14– 17(in Chinese with English abstract).
- [44] 王超, 刘良, 张安达, 等. 阿尔金造山带南缘岩浆混合作用: 玉苏普阿勒克塔格岩体岩石学和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2008, 24(12): 2809–2819.
Wang Chao, Liu Liang, Zhang Anda, et al. Geochemistry of Early Paleozoic Yusupuleke Tagh rapakivi– textured granite complex, South Altyn: An example for magma mixing[J]. *Acta petrologica Sinica*, 2008, 24(12): 2809– 2819(in Chinese with English abstract).
- [45] 王立社, 张巍, 段星星, 等. 阿尔金环形山花岗片麻岩同位素年龄及成因研究[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 119–132.
Wang Lishe, Zhang Wei, Duan Xingxing, et al. Isotopic age and genesis of the monzogranitic gneiss at the Huanxingshan in middle Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(1): 119–132(in Chinese with English abstract).
- [46] 叶晓峰, 宗克清, 张泽明, 等. 北山造山带南缘柳园地区新元古代花岗岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 2015, 32(2–3): 307–317.
Ye Xiaofeng, Zong Keqing, Zhang Zeming, et al. Geochemistry of Neoproterozoic granite in Liuyuan area of southern Beishan orogenic belt and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 32(2– 3): 307– 317(in Chinese with English abstract).
- [47] 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等. 中央造山带(中–西部)前寒武纪地质[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
Lu Songnain, Yu Haifeng, Li Huaikun, et al. *Central Orogenic Belt (Middle– West) Precambrian Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [48] 李琦, 曾忠诚, 陈宁, 等. 阿尔金南缘新元古代盖里克片麻岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *现代地质*, 2015, 29(6): 1271–1283.
Li Qi, Zeng Zhongcheng, Chen Ning, et al. Zircon U– Pb ages, geochemical characteristics and tectonic implications of Neoproterozoic Gailike gneiss in the South Altyn Tagh [J], 2015, 29(6): 1271–1283(in Chinese with English abstract).
- [49] Meert J G, Torsvik T H. The making and unmaking of supercontinent: Rodinia revisited[J]. *Tectonophysics*, 2003, 375(1–4): 261–228.
- [50] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 173(3): 171–181.
- [51] 王超, 刘良, 车自成, 等. 塔里木南缘铁克里克构造带东段前寒武纪地层时代的新限定和新元古代地壳再造: 锆石定年和 Hf 同位素的约束[J]. *地质学报*, 2009, 83(11): 1647–1656.
Wang Chao, Liu Liang, Che Zicheng, et al. Zircon U–Pb and Hf isotopic from the East Segment of Tiekelike tectonic belt: Constrains on the timing of Precambrian basement at the southwestern margin of Tarim[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(11): 1647–1656(in Chinese with English abstract).
- [52] 曾建元, 杨宏仪, 万渝生, 等. 北祁连山变质杂岩中新元古代(–775Ma)岩浆活动纪录的发现: 来自 SHRIMP 锆石 U–Pb 定年的证据[J]. *科学通报*, 2006, 51(5): 575–581.
Zeng Jianyuan, Yang Hongyi, Wan Yusheng, et al. Neoproterozoic (–775Ma) magmatism record North Qilian metamorphic rocks: Evidence from SHRIMP zircon U– Pb[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(5): 575–581(in Chinese).
- [53] 刘函, 王国灿, 曹树钊, 等. 北阿尔金山华纪双峰式火山岩的发现及构造意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2012, 37(5): 917–928.
Liu Han, Wang Guocan, Cao Shuzhao, et al. Discovery of Nanhuai Bimodal volcanics in Northern Altyn Tagh and its tectonic significance[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geoscience*, 2012, 37(5): 917–928(in Chinese with English abstract).
- [54] 郭召杰, 张志诚, 王建君. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的 Sm–Nd 等时线年龄及其大地构造意义[J]. *科学通报*, 1998, 43(18): 1981–1984.
Guo Shaojie, Zhang Zhicheng, Wang Jianjun. Isochron age(Sm–Nd) and tectonic significance in northern margin of Altun

- ophiolite belt[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(18): 1981–1984(in Chinese with English abstract).
- [55] 董顺利, 李忠, 高剑, 等. 阿尔金—祁连—昆仑造山带早古生代构造格架及结晶岩年代学研究进展[J]. 地质论评, 2013, 59(4): 731–746.
- Dong Shunli, Li Zhong, Gao Jian, et al. Progress of studies on early Paleozoic tectonic framework and crystalline rock geochronology in Altun–Qilian–Kunlun orogen[J]. Geological Review, 2013, 59(4): 731–746(in Chinese with English abstract).
- [56] 李德威, 夏义平, 徐礼贵. 大陆板内盆山耦合及盆山成因——以青藏高原及周边盆地为例[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 110–119.
- Li Dewei, Xia Yiping, Xu Ligui. Coupling and formation mechanism of continental intraplate basin and orogen—Examples from the Qinghai–Tibet Plateau and adjacent basins[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 110–119(in Chinese with English abstract).
- [57] Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, et al. Polyphase tectonothermal history recorded in granulitized gneisses from the North Qaidam HP/UHP metamorphic terrane, Western China: Evidence from zircon U–Pb geochronology[J]. Geological Society of America Bulletin, 2008, 120(5/6): 732–749.
- [58] 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等. 柴达木盆地北缘新元古代蛇绿岩的厘定——罗迪尼亚大陆裂解的证据? [J]. 地质通报, 2004, 23(9–10): 892–898.
- Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, et al. Recognition of Neoproterozoic ophiolite on the Northern margin of the Qaidam basin: evidence of breakup of Rodinia[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9/10): 892–898(in Chinese with English abstract).
- [59] 陈宣华, Gehrels G, 王小凤, 等. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(4): 294–298.
- Chen Xuanhua, Gehrels G, Wang Xiaofeng, et al. Tectonic environments of magmatism in Early Paleozoic in the north Altyn Tagh[J]. Journal of geomechanics, 2003, 22(4): 294–298(in Chinese with English abstract).
- [60] 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 等. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗岩体特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 846–858.
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Yao Shangzhi, et al. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 846–858(in Chinese with English abstract).
- [61] 陈丹玲, 孙勇, 刘良, 等. 柴北缘鱼卡河榴辉岩的超高压变质年龄: 锆石 LA–ICP–MS 微区定年[J]. 中国科学, 2007, 37(增刊): 279–287.
- Chen Danling, Sun Yong, Liu Liang, et al. The eclogite UHP age in North Qaidam: Zircon LA–ICP–MS micro dating[J]. Science China Press, 37(supp.): 279–287(in Chinese with English abstract).
- [62] Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: a case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data[J]. Journal of Petrology, 2006, 47: 435–455.