

阿尔金喀腊大湾地区中酸性火山岩 SHRIMP 年龄及其构造环境

陈柏林¹⁾, 李松彬¹⁾, 蒋荣宝¹⁾, 陈正乐¹⁾, 韩凤彬¹⁾, 崔玲玲¹⁾, 李丽¹⁾, 赵树铭²⁾,
祁万修²⁾, 杨屹²⁾, 王世新²⁾, 王永¹⁾, 周永贵¹⁾, 郝瑞祥¹⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;

2) 新疆地质调查院第一地质调查所, 乌鲁木齐, 830011

内容提要:阿尔金山喀腊大湾地区位于北东向阿尔金走滑断裂北侧与东西向阿尔金北缘断裂所夹持的区域, 是区域上红柳沟—拉配泉构造带的中段。该区广泛发育火山—沉积岩系, 前人将其确定为中元古代。本文运用锆石 SHRIMP U-Pb 方法对区内火山—沉积岩系中的中酸性火山岩进行测年, 获得 477~485Ma 的年龄, 确认喀腊大湾地区早古生代中酸性岩浆喷发活动的存在。同时根据岩石地球化学研究, 显示这套火山岩具有活动大陆边缘(岛弧)构造环境, 其岩浆源具有 I 型及 I 与 S 过渡类型特点。结合前人对红柳沟—拉配泉一带的蛇绿混杂岩、高压变质泥岩、榴辉岩、中酸性侵入岩等相关年代资料及构造环境示踪, 作者认为喀腊大湾地区中酸性火山岩形成于活动大陆边缘(岛弧)大地构造环境, 其时限与蛇绿混杂岩的末期非常接近, 代表了洋壳俯冲碰撞过程中形成的同碰撞中酸性火山岩。据此可以将区域上红柳沟—拉配泉一带的构造演化划分为洋壳扩张期(晚元古代末—寒武纪, 蛇绿混杂岩年龄 510~580Ma, 但扩张起始会早一些)、洋壳板块俯冲碰撞期(早奥陶世—中奥陶世早期, 中酸性岩浆岩(包括侵入岩和火山岩)年龄为 477~488 Ma(部分花岗岩年龄延迟到 467Ma 左右), 以及高压变质岩的退变质年龄 479~491Ma), 碰撞后伸展期(晚奥陶世—志留纪, 蛇绿混杂岩变质基质岩系的变质年龄 450~455Ma, 代表蛇绿混杂岩最后就位, 碰撞—碰撞后 S 型碱性花岗岩年龄 417~431Ma, 代表碰撞后伸展构造环境)三个演化阶段。

关键词:中酸性火山岩; SHRIMP 年龄; 构造环境与演化; 喀腊大湾地区; 阿尔金山

阿尔金山东段喀腊大湾地区位于北东向阿尔金走滑断裂北侧与东西向阿尔金北缘断裂所夹持的区域, 北接塔里木地块南缘, 南与柴达木盆地毗邻。阿尔金断裂带和阿尔金山地区的区域构造演化已经成为最近十几年来的研究热点(Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993; Guo Zhaojie et al., 1998; Liu Liang et al., 1998, 1999; Zhang Jianxin et al., 2007; Cui Junwen et al., 1999; Yin A et al., 2002; Sobel et al., 1999; Chen Zhengle et al., 2002; Chen Xuanhua et al., 2003; Liu Y J et al., 2007; Chen Bailin et al., 2010; Liu Yongshun et al., 2009; Han Fengbin et al., 2012)。20 世纪 90 年代中期以来, 该区在地质找矿上也取得了重大进展(Yang Yi et al., 2004; Chen Bailin et al., 2009,

2012, 2014)。但是对该区一套火山—沉积岩系年代学及其构造环境的研究却非常薄弱, 20 世纪 80 年代初期完成的 1/20 万索尔库里幅区域地质矿产调查(Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1981)将区内的火山—沉积岩系确定为震旦系, 90 年代初地层清理后改为在元古界(Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993)。Gehrels et al. (2003) 和 Chen Xuanhua et al. (2003) 较早运用锆石 U-Pb 稀释法年龄讨论了青藏高原北缘地区、阿尔金北缘地区岩浆演化特点, 提出早古生代岩浆活动的初步认识, 但仅限于讨论个别中酸性侵入岩; 之后未开展相关研究工作; 对这套火山—沉积岩系的时代一直存在争议, 与相邻图的俄博梁幅(Bureau of Geology and Mineral

注: 本文为“十一·五”、“十二·五”国家科技支撑计划重点项目(编号: 2006BAB07B02-04、2011BAB06B08-04)和地质矿产调查专项(编号: 1212011085043)的资助成果。

收稿日期: 2015-02-07; 改回日期: 2015-06-08; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 陈柏林, 男, 1962 年生, 研究员, 主要从事区域构造、矿田构造和成矿预测研究。通讯地址: 100081, 北京市海淀区民族学院南路 11 号, 中国地质科学院地质力学研究所; Email: cblh6299@263.net。

Resources of Qinghai Province, 1981) 对比也有较大出入。本文首次对阿尔金山东段喀腊大湾地区的中酸性火山岩开展锆石 SHRIMP 测年, 获得 477~488Ma 的年龄, 反映了该区早古生代火山活动及其演化, 结合岩石化学探讨其区域构造环境特点。

1 地质构造背景

在大地构造上, 阿尔金山喀腊大湾地区位于阿尔金走滑断裂北侧与东西向阿尔金北缘断裂所夹持地区的北侧, 北接塔里木地块南缘, 南与柴达木盆地毗邻(图 1)。著名的阿尔金左行走滑断裂在研究区东南角穿越。

已有研究显示, 在震旦纪晚期——早古生代早期, 红柳沟-拉配泉裂谷带(有限洋盆) 扩张, 晚寒武世开始发生板块俯冲作用, 至中奥陶世发生板块碰撞作用(Cui Junwen et al., 1999; Liu Liang et al.,

1999; Qi Xuexiang et al., 2005; Zhang Jianxin et al., 2007, Yang Jingsui et al., 2008)。晚中生代以来由于印度板块与欧亚板块碰撞造山的远程效应, 阿尔金断裂带发生了大规模的左行走滑(Cui Junwen et al., 1999; Chen Zhengle et al., 2002; Liu Y J et al., 2007; Chen Bailin et al., 2010), 而阿尔金山喀腊大湾地区更多地表现出挤压体制的变形特点。

研究区内构造线以近东西向为特征(图 1), 主干断裂主要为东西向, 一级断裂有喀腊达坂断裂和阿尔金北缘断裂, 呈东西向横贯区域南北两侧; 二级断裂有白尖山断裂, 呈东西贯穿研究区中北部; 低级别(次级) 小断裂也非常发育, 呈北东东向和北西向, 断裂性质以压性、压扭性为主。其中阿尔金北缘断裂规模巨大, 出露于研究区北部, 是太古界与下古生界奥陶系之间的界线。在喀腊大湾沟沿北缘断裂发

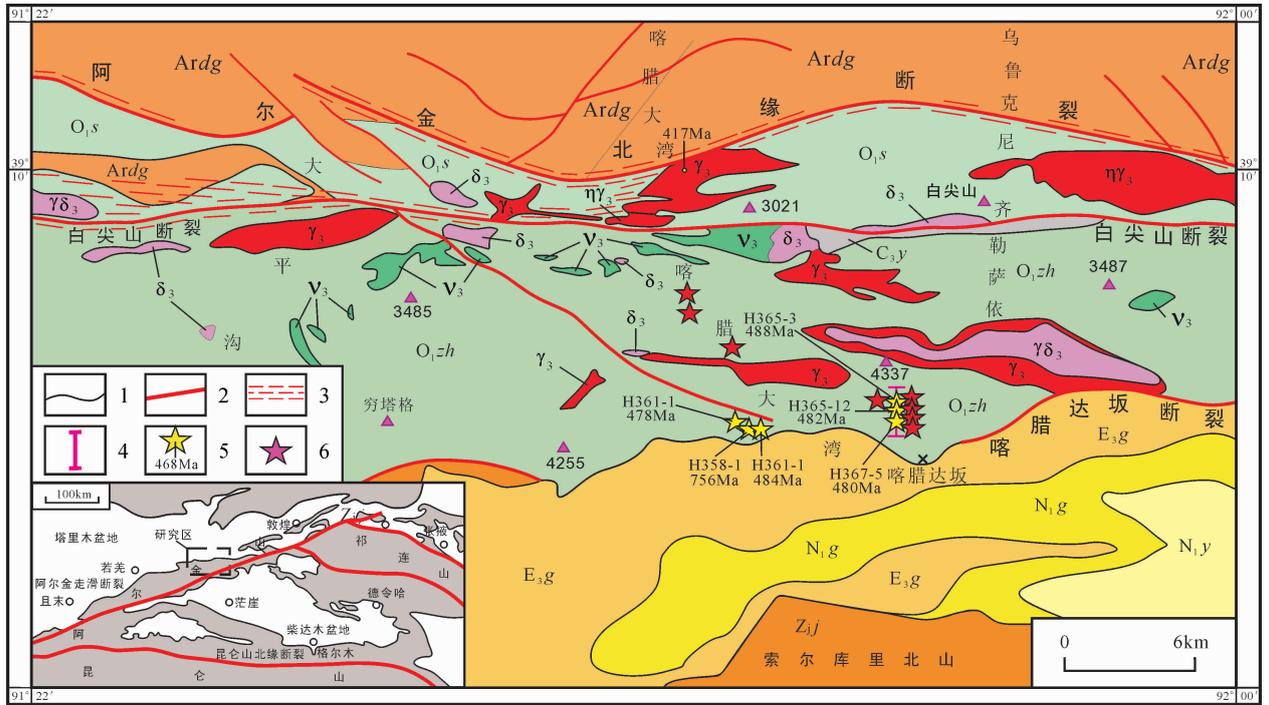


图 1 阿尔金山喀腊大湾地区地质构造及火山岩年龄分布图

Fig. 1 Map of geological structure and volcanic rock and their ages in Kaladawan area, Altun Mountains

N_{1y} —中新世下油砂山组; N_{1g} —中新世上干柴沟组; E_{3g} —渐新世下干柴沟组; C_{3y} —石炭系上统固格布拉克组; O_{1s} —斯米尔布拉克组; O_{1zh} —卓阿布拉克组; Z_{jj} —金雁山组; $Ardg$ —太古界达格拉格布拉克组; δ_3 —早古生代闪长岩; $\gamma\delta_3$ —早古生代花岗闪长岩; γ_3 —早古生代花岗岩岩; $\eta\gamma_3$ —早古生代似斑状二长花岗岩; v_3 —早古生代辉长岩; 1—地质界线; 2—断裂; 3—韧脆性变形带; 4—火山岩剖面(图 2)位置; 5—SHRIMP 年龄及采样点; 6—岩石化学采样点

N_{1y} —Lower Youshashan Formation of Miocene; N_{1g} —Upper Ganchaigou Formation of Miocene; E_{3g} —Lower Ganchaigou Formation of Oligocene; C_{3y} —Yin’gebulake Formation of Upper Series of Carboniferous System; O_{1s} —Simi’erbulake Formation of Lower Ordovician Series; O_{1zh} —Zhabulake Formation of Lower Ordovician Series; Z_{jj} —Jinyanshan Formation; $Ardg$ —Dagelagebulake Formation of Archean; δ_3 —diorite of Early Paleozoic; $\gamma\delta_3$ —granodiorite of Early Paleozoic; γ_3 —granite of Early Paleozoic; $\eta\gamma_3$ —porphyritic adamellite of Early Paleozoic; v_3 —gabbro of Early Paleozoic; 1—line of geological limitation; 2—fault; 3—ductill-brittle deformation belt; 4—section of volcanic rocks (Fig. 2); 5—samples and their SHRIMP age; 6—samples for rocks geochemistry

育糜棱岩化带和碎裂岩化带,宽度超过600m。喀腊达坂断裂位于研究区南部,是下古生界与震旦系(西段)或下古生界与新生界(东段)之间的界线。白尖山断裂位于研究区中北部的白尖山南侧,该断裂部分为卓阿布拉克组(O_1z_h)与斯米尔布拉克组(O_1s)之间的界线(图1)。

依据最新测年数据(Gehrels et al., 2003; Chen Xuanhua et al., 2003; Han Fengbin et al., 2012),研究区岩浆侵入活动主要为早古生代(图1)。

研究区地层属于塔里木地层区中塔南地层分区的阿尔金山地层小区(Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1981, 1993),结合该区火山—沉积岩系最新测年资料,自老到新依次出露太古界达格拉格布拉克组(Ardg),中元古界蓟县系金雁山组(Z_j),下古生界下奥陶统卓阿布拉克组(O_1z_h)、斯米尔布拉克组(O_1s),石炭系上石炭统因格布拉克组(C_3y),古近系渐新统下干柴沟组(E_3g)、新近系中新统上干柴沟组(N_1g)、中新统下油砂山组(N_1y)和第四系(Q)(图1)。

斯米尔布拉克组(O_1s)为一套火山—沉积岩系,其中火山岩部分以中基性火山岩为主。由于临近阿北断裂带并分布于阿北断裂带与白尖山断裂之间,受后期构造的改造,火山—沉积岩几乎全部呈直立状态,构造变形非常强烈、并经历低绿片岩相动力变质作用。

卓阿布拉克组(O_1z_h)也是一套火山—沉积岩系,其中火山岩部分在北部以中基性火山岩为主,中南部以中酸性火山岩为主。虽然发生一定程度构造变形,但是比斯米尔布拉克组构造变形要弱得多,变质作用以低绿片岩相为特点。尤其在喀腊达坂铅锌矿区,卓阿布拉克组火山—沉积岩变形变质作用相对较低,火山喷发—沉积旋回比较清楚,因此作为岩性研究剖面 and 年代学的主要采样点。同时在喀腊达坂铅锌矿区沿走向向西约5km的喀腊大湾铜锌矿区补充部分年代学样品。

2 卓阿布拉克组(O_1z_h)火山—沉积地层剖面

卓阿布拉克组(O_1z_h)火山—沉积地层剖面以喀腊达坂铅锌矿区剖面最为典型,依据岩石类型及其组合特点,自南向北、由老至新划分出6个岩性段,其中第一岩性段主体在矿区以南,不作细述外,第二至第六岩性段分述如下(图2)。

第二岩性段($O_1z_h^2$):主要为沉积岩;分布在矿区中南部,岩性为浅灰绿色泥质与凝灰质砂岩互层,夹灰黑色灰岩、炭质泥岩、粉砂岩及石英钠长斑岩,厚度约450m,未见底。

第三岩性段($O_1z_h^3$):主要为酸性—中酸性火山凝灰岩;分布于矿区中部,厚度350~1000m。

第四岩性段($O_1z_h^4$):主要为酸性熔岩、酸性火山凝灰岩,以晶屑凝灰岩最为特征,夹少量辉绿岩脉和石英脉,为矿区含矿岩性段;地层产状为:298°/NE64°,分布在矿区中部和东南角。地表风化后呈白色、灰白色为主,新鲜岩石为稍深的灰白色或灰色。本岩性段为矿化蚀变带,各种蚀变强烈而多样,最主要的是岩石普遍具褐铁矿化,同时发育硅化、绢云母化、黄钾铁矾化、滑石化、重晶石化等;同时发育方铅矿、闪锌矿及铜蓝、孔雀石等矿化,矿带中已圈出39个矿体,绝大多数在本岩性段内。厚度350~900m。

第五岩性段($O_1z_h^5$):主要为中性熔岩—凝灰岩,夹极少量泥岩、泥灰岩;地层产状为:295°/NE55°,分布在矿区北部和东部,岩石类型单一,层内发育辉绿岩脉和石英脉,厚度200~2000m。

第六岩性段($O_1z_h^6$):主要为沉积岩。地层产状为:290°/NE48°,分布于矿区北部,主要为一套正常沉积的碎屑岩。岩性分为三部分:下部以灰黑色泥灰岩为主夹少量灰岩和泥岩透镜体;中部以砂岩、粉砂岩为主,夹少量泥岩、泥灰岩;上部以浅灰色泥灰岩为主夹少量灰岩和泥岩透镜体。其中在H365地质观察点,中部的浅变质细砂岩中发育交错层理,指示北侧为上部层位,南侧为下部层位,厚度大于200m。

在喀腊大湾铜锌矿,主要为酸性火山岩。在研究区以东80km的拉配泉地区,出露酸性火山岩和基性火山岩(枕状玄武岩),该2处采样点,火山岩剖面不一—细述。

3 锆石 SHRIMP 测年

3.1 选样与测试分析方法

共选择6个中酸性火山岩样品,在喀腊达坂铅锌矿剖面选择2个酸性火山岩和1个中性火山岩样品、在喀腊大湾铜锌矿选择2个酸性火山岩样品、在拉配泉地区选择1个酸性火山岩样品,用常规方法将岩石样品粉碎至约300 μ m,经磁法和密度分选后,淘洗、挑纯锆石单矿物。多数样品的锆石颗粒中等偏大,在0.12~0.20mm,部分可达0.25~

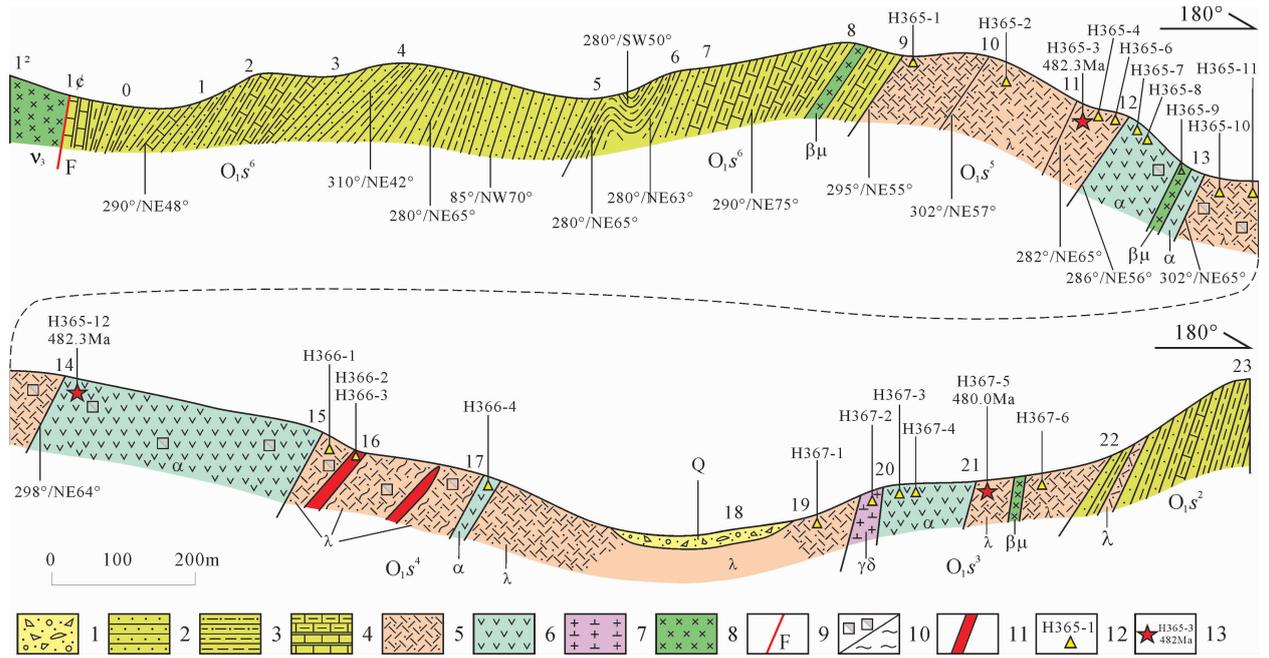


图 2 阿尔金喀腊大湾地区喀腊达坂铅锌矿区卓阿布拉克组岩性剖面图

Fig. 2 Lithologic section of Lower Ordovician Zhuo'abulake Formation in Kaldaban Pb-Zn deposit, Kaladawan area, Altun Mountains

O_1zh^2 —卓阿布拉克组第二岩性段; O_1zh^3 —卓阿布拉克组第三岩性段; O_1zh^4 —卓阿布拉克组第四岩性段; O_1zh^5 —卓阿布拉克组第五岩性段; O_1zh^6 —卓阿布拉克组第六岩性段; 1—第四系; 2—砂岩; 3—粉砂岩/泥岩; 4—泥灰岩/灰岩; 5—流纹质晶屑凝灰岩; 6—安山岩; 7—花岗闪长岩; 8—辉绿岩; 9—断层; 10—黄铁矿化/绢云母化; 11—铅锌矿体; 12—岩石化学样品位置; 13—锆石 SHRIMP 年龄及其样品位置
 O_1zh^2 —The Second Part of Zhuo'abulake Formation; O_1zh^3 —the Third Part of Zhuo'abulake Formation; O_1zh^4 —the Forth Part of Zhuo'abulake Formation; O_1zh^5 —the Fifth Part of Zhuo'abulake Formation; 1—Quaternary System; 2—sandstone; 3—siltstone/mudstone; 4—marl/limestone; 5—rhyolite crystal tuff; 6—andesite; 7—granodiorite; 8—diabase; 9—fault; 10—pyritization/sericitization; 11—Pb-Zn orebody; 12—samples for rocks geochemistry; 13—samples and their SHRIMP age

0.30mm, 少数样品锆石颗粒偏小, 在 0.06 ~ 0.12mm。然后将锆石样品和标样(TEM)一起用环氧树脂固定于样品靶上。样品靶表面经研磨抛光, 直至锆石新鲜截面露出。对靶上锆石进行镜下反射光、透射光照相后, 进行 CL 分析, 再进行镀金以备分析。阴极发光成像(CL)(图 3)在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室完成。

锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测试数据在北京离子探针中心的网络虚拟实验室, 通过 SHRIMP 远程共享控制系统 (SHRIMP Remote Operation System, SROS) 远程控制位于澳大利亚 Curtin 理工大学 (Curtin University of Techonology) 的 SHRIMP II 分析仪上获得, 数据通过 Internae 网络实现传输, 依据 Compston et al. (1992) 和 William et al. (1996, 1998) 的分析流程和原理, 采用跳峰扫描, 记录 ZrO^+ 、 $^{204}Pb^+$ 、背景值、 $^{207}Pb^+$ 、 $^{208}Pb^+$ 、 U^+ 、 Th^+ 、 ThO^+ 和 UO^+ 9 个离子束峰, 每 7 次扫描记录一次平均值。一次离子流为 4.0 nA, 加速电压约 10 kV 的 O^{-2} , 样品靶上的离子束斑直

径约为 25~30 μm , 质量分辨率约 5000(1%峰高)。应用澳大利亚地调局标准锆石 TEM(417 Ma) 进行元素间的分馏校正。应用 RSES(澳大利亚国立大学地学院) 参考标样锆石 M257(年龄 417 Ma, U 含量 840×10^{-6}) 标定所测锆石的 U、Th 和 Pb 含量。分析时每测 3~4 次样品后测定一次标样(TEM), 以控制仪器的稳定性和离子记数统计的精确性。数据处理采用 Ludwig(2001, 2003) 的 ISOPLLOT 及 SQUID1.02 程序, 并尽量避免系统误差(Song Biao et al., 2006)。表 1 列出主要测试结果, 并给出 ^{204}Pb 和 ^{208}Pb 两种普通铅校正的年龄结果。表 1 中所列单个数据点的误差均为 1σ , 加权平均年龄具 95% 的置信度。本文使用 ^{208}Pb 校正的结果(也满足 U 含量要大于等于 Th 含量的条件, 即表 1 中为 $^{232}Th/^{238}U$ 绝大多数小于等于 1)。

3.2 喀腊达坂铅锌矿酸性火山岩年龄

测试了 2 个样品, 分别采自喀腊达坂铅锌矿第 3 岩性段酸性火山岩和第 4 岩性段含矿酸性火山岩。

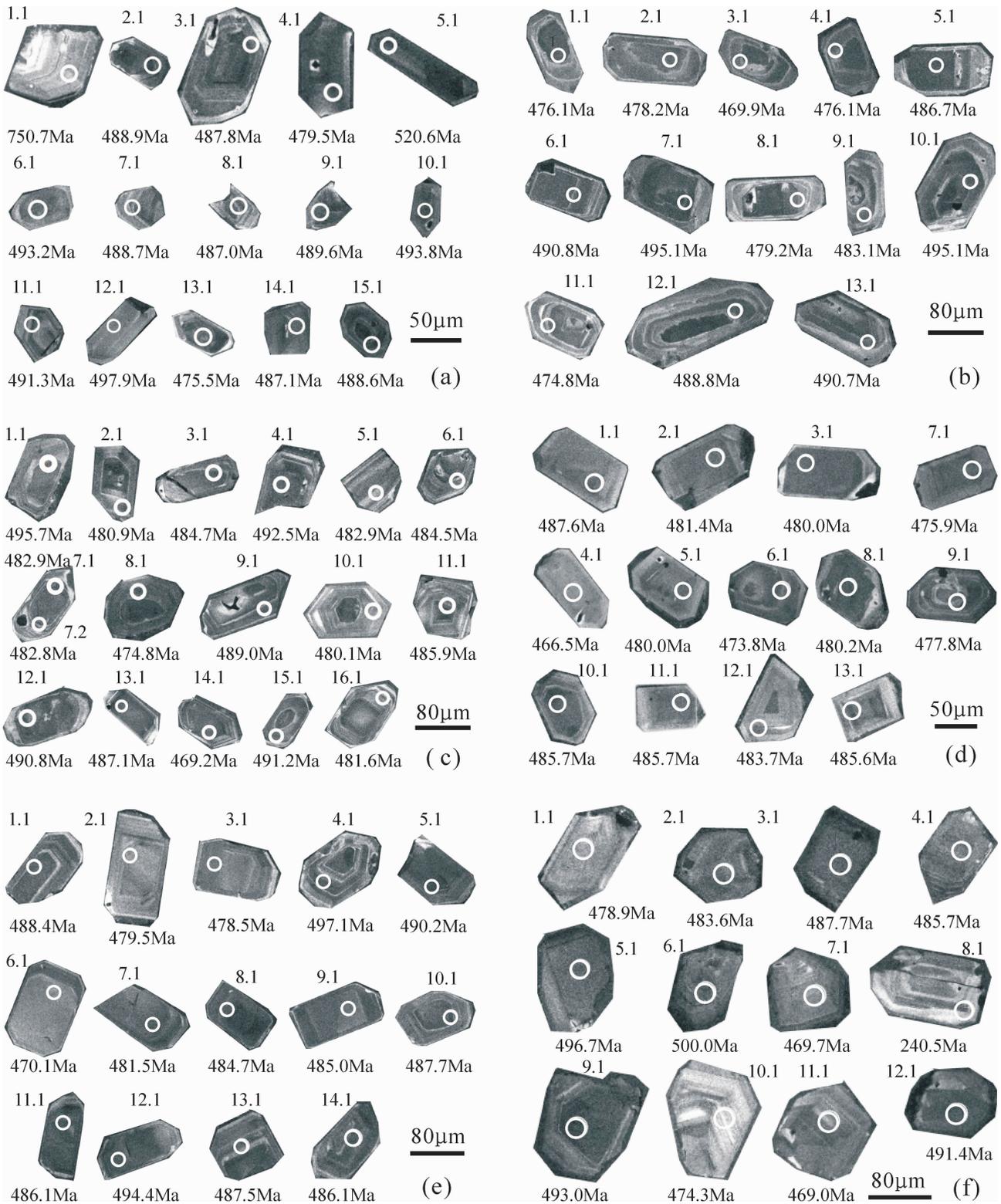


图3 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性火山岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of zircons of the intermediate-acid volcanic rocks in Kaladawan area, Altun Mountains, NW China

(a)—喀腊达坂铅锌矿酸性火山岩(H365-3);(b)—喀腊达坂铅锌矿酸性火山岩(H367-5);(c)——喀腊达坂铅锌矿中性火山岩(H365-12);(d)——喀腊大湾铜锌矿酸性火山岩(H360-1);(e)——喀腊大湾铜锌矿酸性火山岩(H361-1);(f)——拉配泉酸性火山岩(H378-1)

(a)—Acidic volcanic rocks in Kaladaban Pb-Zn deposit (H365-3); (b)—acidic volcanic rocks in Kaladaban Pb-Zn deposit (H367-5); (c)—intermediate volcanic rocks in Kaladaban Pb-Zn deposit (H365-12); (d)—acidic volcanic rocks in Kaladawan Cu-Zn deposit (H360-1); (e)—acidic volcanic rocks in Kaladawan Cu-Zn deposit (H361-1); (f)—acidic volcanic rocks in Lapeiquan area

表 1 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 1 SHRIMP U-Pb dating for zircons of the intermediate-acid volcanic rocks from Kaladawan area of Altun Mountains

测点号	²⁰⁶ Pb/ (%)	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* ($\times 10^{-6}$)	总 ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	误差 ($\pm\%$)	总 ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	误差 ($\pm\%$)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	误差 ($\pm\%$)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	误差 ($\pm\%$)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄(Ma)①	误差 (1 σ)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄(Ma)②	误差 (1 σ)
(1) 喀腊达坂铅锌矿酸性火山岩(H365-3)																	
1.1	0.65	224	116	0.54	23.7	8.11	2.0	0.0671	1.5	0.123	2.0	0.067	1.5	744.7	14.0	750.7	15.3
2.1	0.44	660	393	0.62	44.5	12.74	2.0	0.0586	1.2	0.078	2.0	0.059	1.2	485.1	9.6	488.9	10.6
3.1	0.29	545	271	0.51	36.8	12.73	1.9	0.0591	1.3	0.079	1.9	0.059	1.3	486.0	8.8	487.8	9.6
4.1	0.46	435	334	0.79	28.9	12.93	1.9	0.0619	1.5	0.077	1.9	0.062	1.5	477.9	8.9	479.5	10.1
5.1	1.59	325	231	0.74	23.6	11.85	2.0	0.0659	1.6	0.084	2.0	0.066	1.6	514.4	9.9	520.6	11.1
6.1	1.13	276	144	0.54	18.9	12.55	2.0	0.0638	1.8	0.080	2.0	0.064	1.8	488.7	9.5	493.2	10.3
7.1	1.27	252	120	0.49	17.1	12.60	2.0	0.0628	1.8	0.079	2.0	0.063	1.8	486.2	9.4	488.7	10.3
8.1	1.05	446	283	0.65	30.2	12.69	1.9	0.0604	3.3	0.079	1.9	0.060	3.3	484.1	8.9	487.0	10.0
9.1	1.26	267	111	0.43	18.3	12.55	2.2	0.0680	2.5	0.080	2.2	0.068	2.5	488.4	10.4	489.6	11.2
10.1	0.92	456	393	0.89	31.2	12.53	1.9	0.0620	1.4	0.080	1.9	0.062	1.4	490.5	9.1	493.8	10.6
11.1	0.82	490	329	0.69	33.5	12.55	1.9	0.0611	1.4	0.080	1.9	0.061	1.4	490.3	9.0	491.3	10.1
12.1	1.01	168	100	0.61	11.8	12.24	2.2	0.0709	4.2	0.082	2.2	0.071	4.2	501.3	10.9	497.9	12.0
13.1	0.73	468	273	0.60	30.9	13.00	1.9	0.0629	2.3	0.077	1.9	0.063	2.3	474.3	8.9	475.5	9.9
14.1	0.48	569	393	0.71	38.5	12.71	1.9	0.0609	1.3	0.079	1.9	0.061	1.3	486.1	8.8	487.1	10.0
15.1	0.67	501	276	0.57	34.0	12.65	1.9	0.0616	2.4	0.079	1.9	0.062	2.4	487.2	9.0	488.6	9.9
(2) 喀腊达坂铅锌矿酸性火山岩(H367-5)																	
1.1	0.56	398	193	0.50	26.3	13.00	1.9	0.0614	1.5	0.077	1.9	0.061	1.5	475.2	8.9	476.1	9.6
2.1	0.63	323	147	0.47	21.4	12.95	2.0	0.0608	2.7	0.077	2.0	0.061	2.7	476.4	9.0	478.2	9.8
3.1	0.77	222	87	0.40	14.5	13.16	2.0	0.0640	2.0	0.076	2.0	0.064	2.0	468.7	9.3	469.9	9.9
4.1	0.75	259	113	0.45	17.1	12.96	2.2	0.0620	1.9	0.077	2.2	0.062	1.9	475.5	10.2	476.1	10.9
5.1	0.24	493	239	0.50	33.2	12.74	1.9	0.0583	1.4	0.078	1.9	0.058	1.4	486.0	8.9	486.7	9.6
6.1	0.60	353	148	0.43	24.1	12.60	1.9	0.0597	1.6	0.079	1.9	0.060	1.6	489.5	9.2	490.8	9.8
7.1	0.70	403	194	0.50	27.7	12.48	1.9	0.0607	1.4	0.080	1.9	0.061	1.4	493.4	9.1	495.1	9.9
8.1	0.96	229	83	0.38	15.2	12.89	2.0	0.0640	1.9	0.078	2.0	0.064	1.9	477.3	9.5	479.2	10.0
9.1	0.42	288	111	0.40	19.3	12.79	2.0	0.0605	1.9	0.078	2.0	0.061	1.9	483.4	9.5	483.2	10.2
10.1	0.84	329	145	0.45	22.7	12.46	2.0	0.0619	1.6	0.080	2.0	0.062	1.6	493.7	9.4	495.1	10.1
11.1	0.79	279	119	0.44	18.4	13.00	2.0	0.0625	2.6	0.077	2.0	0.062	2.6	474.1	9.1	474.8	9.8
12.1	0.65	333	135	0.42	22.6	12.65	2.0	0.0617	1.6	0.079	2.0	0.062	1.6	487.3	9.2	488.8	9.9
13.1	0.67	410	184	0.46	27.9	12.63	1.9	0.0607	1.5	0.079	1.9	0.061	1.5	487.8	9.1	490.7	9.8
(3) 喀腊达坂铅锌矿中性火山岩(H365-12)																	
1.1	0.64	295	176	0.62	20.3	12.48	2.0	0.0605	2.8	0.080	2.0	0.060	2.8	494.0	9.5	495.7	10.6
2.1	0.42	382	229	0.62	25.4	12.90	1.9	0.0605	1.6	0.078	1.9	0.061	1.6	479.4	9.0	480.9	10.0
3.1	0.74	433	293	0.70	29.0	12.81	1.9	0.0628	1.5	0.078	1.9	0.063	1.5	481.0	9.0	484.7	10.1
4.1	0.65	392	202	0.53	26.8	12.56	1.9	0.0603	1.6	0.080	1.9	0.060	1.6	490.6	9.2	492.5	10.0
5.1	1.14	306	220	0.74	20.5	12.81	2.0	0.0650	1.7	0.078	2.0	0.065	1.7	479.2	9.3	482.9	10.5
6.1	0.46	443	264	0.62	29.8	12.77	1.9	0.0617	1.7	0.078	1.9	0.062	1.7	483.8	9.0	484.5	10.0
7.1	0.87	605	406	0.69	40.6	12.81	1.9	0.0619	1.3	0.078	1.9	0.062	1.3	480.5	8.9	482.9	10.0
7.2	0.58	460	302	0.68	30.9	12.78	1.9	0.0637	3.1	0.078	1.9	0.064	3.1	482.9	9.0	482.8	10.0
8.1	1.29	348	199	0.59	23.0	12.97	2.0	0.0666	1.6	0.077	2.0	0.067	1.6	473.0	9.2	474.8	10.2
9.1	1.86	431	268	0.64	29.4	12.61	1.9	0.0722	1.3	0.079	1.9	0.072	1.3	483.1	9.0	489.0	10.1
10.1	0.76	570	473	0.86	37.5	13.05	1.9	0.0631	1.6	0.077	1.9	0.063	1.6	472.5	8.7	480.1	10.0
11.1	1.30	323	176	0.56	21.9	12.69	2.0	0.0688	2.8	0.079	2.0	0.069	2.8	482.9	9.3	485.9	10.2
12.1	1.02	372	194	0.54	25.5	12.52	1.9	0.0685	1.5	0.080	1.9	0.068	1.5	490.5	9.3	490.8	10.2
13.1	0.87	664	427	0.66	44.9	12.69	1.9	0.0628	1.2	0.079	1.9	0.063	1.2	484.7	8.8	487.1	9.8
14.1	0.78	581	408	0.73	37.8	13.21	1.9	0.0629	2.0	0.076	1.9	0.063	2.0	466.9	8.5	469.2	9.6
15.1	0.60	514	326	0.66	35.2	12.54	1.9	0.0621	1.3	0.080	1.9	0.062	1.3	491.9	9.0	491.2	10.0
16.1	0.90	352	177	0.52	23.6	12.82	2.1	0.0625	2.3	0.078	2.1	0.063	2.3	480.1	9.9	481.6	10.8
(4) 喀腊大湾铜锌矿东酸性火山岩(H360-1)																	
1.1	0.38	596	395	0.68	40.1	12.77	1.9	0.0586	1.3	0.078	1.9	0.059	1.3	484.2	8.8	487.6	9.9
2.1	0.72	446	207	0.48	29.7	12.90	1.9	0.0619	1.7	0.077	1.9	0.062	1.7	477.8	9.0	481.4	9.7
3.1	0.43	732	446	0.63	48.5	12.96	2.0	0.0587	1.2	0.077	2.0	0.059	1.2	477.1	9.3	480.4	10.3
4.1	0.80	413	230	0.58	26.8	13.27	2.0	0.0613	2.3	0.075	2.0	0.061	2.3	464.6	8.8	466.5	9.7

续表 1

测点号	²⁰⁶ Pbc (%)	U (×10 ⁻⁶)	Th (×10 ⁻⁶)	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* (×10 ⁻⁶)	总 ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	误差 (±%)	总 ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	误差 (±%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	误差 (±%)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	误差 (±%)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	误差 (1σ)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	误差 (1σ)
5.1	0.38	675	482	0.74	44.6	13.00	1.9	0.0590	1.4	0.077	1.9	0.059	1.4	476.0	8.7	480.0	9.8
6.1	0.84	430	204	0.49	28.3	13.03	1.9	0.0624	1.6	0.077	1.9	0.062	1.6	472.9	8.9	473.8	9.7
7.1	1.04	348	198	0.59	23.0	13.00	2.0	0.0631	1.9	0.077	2.0	0.063	1.9	473.0	9.2	475.9	10.1
8.1	0.39	579	335	0.60	38.5	12.93	1.9	0.0601	1.2	0.077	1.9	0.060	1.2	478.5	8.7	480.2	9.6
9.1	0.62	384	221	0.60	25.4	13.00	1.9	0.0603	1.8	0.077	1.9	0.060	1.8	474.7	8.9	477.8	9.8
10.1	0.26	907	646	0.74	60.7	12.83	1.9	0.0588	1.0	0.078	1.9	0.059	1.0	482.6	9.0	485.7	10.2
11.1	0.43	662	434	0.68	44.3	12.82	1.9	0.0589	1.2	0.078	1.9	0.059	1.2	482.2	8.7	485.7	9.7
12.1	0.39	391	203	0.54	26.2	12.82	1.9	0.0585	2.2	0.078	1.9	0.058	2.2	482.2	9.0	483.7	9.8
13.1	0.30	770	626	0.84	51.5	12.84	1.8	0.0585	1.1	0.078	1.8	0.058	1.1	482.0	8.6	485.6	9.9
(5)喀腊大湾铜锌矿东酸性火山岩(H361-1)																	
1.1	0.20	625	346	0.57	42.2	12.73	2.1	0.0574	1.5	0.079	2.1	0.057	1.5	486.6	9.7	488.4	10.6
2.1	0.89	332	182	0.57	22.1	12.92	2.0	0.0607	1.6	0.077	2.0	0.061	1.6	476.5	9.2	479.5	10.1
3.1	0.25	393	195	0.51	26.1	12.93	1.9	0.0592	1.5	0.077	1.9	0.059	1.5	478.9	8.9	478.5	9.6
4.1	0.23	723	472	0.67	49.8	12.48	1.9	0.0583	1.1	0.080	1.9	0.058	1.1	496.0	8.8	497.1	9.9
5.1	0.21	653	398	0.63	44.3	12.68	1.9	0.0581	1.2	0.079	1.9	0.058	1.2	488.4	8.8	490.2	9.7
6.1	1.09	277	135	0.50	18.1	13.16	2.0	0.0646	2.3	0.076	2.0	0.065	2.3	467.1	9.4	470.0	10.1
7.1	0.58	459	256	0.58	30.6	12.88	1.9	0.0605	1.8	0.078	1.9	0.060	1.8	479.2	8.9	481.5	9.7
8.1	0.32	428	205	0.49	28.7	12.82	1.9	0.0576	1.5	0.078	1.9	0.058	1.5	482.8	8.9	484.7	9.7
9.1	0.38	450	239	0.55	30.2	12.81	1.9	0.0602	1.4	0.078	1.9	0.060	1.4	482.6	8.9	485.0	9.7
10.1	0.58	570	314	0.57	38.5	12.70	1.9	0.0600	1.3	0.079	1.9	0.060	1.3	485.8	8.8	487.7	9.7
11.1	0.27	512	275	0.55	34.3	12.80	1.9	0.0586	1.4	0.078	1.9	0.059	1.4	483.5	8.9	486.1	9.7
12.1	0.25	538	290	0.56	36.8	12.54	1.9	0.0578	1.3	0.080	1.9	0.058	1.3	493.5	9.0	494.4	9.8
13.1	0.62	433	217	0.52	29.4	12.67	1.9	0.0600	1.6	0.079	1.9	0.060	1.6	486.8	9.1	487.5	9.9
14.1	0.62	519	294	0.59	34.8	12.80	1.9	0.0607	1.3	0.078	1.9	0.061	1.3	482.2	8.8	486.1	9.7
(6)拉配泉酸性火山岩(H378-1)																	
1.1	0.62	381	260	0.71	25.3	12.92	1.9	0.0598	2.3	0.077	1.9	0.060	2.3	477.5	8.9	478.9	10.1
2.1	0.43	284	190	0.69	19.1	12.79	2.4	0.0610	1.7	0.078	2.4	0.061	1.7	483.3	11.0	483.6	12.4
3.1	0.68	411	259	0.65	27.8	12.70	2.1	0.0603	1.5	0.079	2.1	0.060	1.5	485.6	9.7	487.7	10.8
4.1	0.26	683	511	0.77	45.9	12.80	1.9	0.0582	1.2	0.078	1.9	0.058	1.2	483.9	8.7	485.7	9.9
5.1	0.34	501	336	0.69	34.6	12.45	2.1	0.0594	1.3	0.080	2.1	0.059	1.3	496.2	10.0	496.7	11.2
6.1	0.52	489	430	0.91	34.0	12.35	2.1	0.0613	1.3	0.081	2.1	0.061	1.3	499.3	10.0	500.0	11.7
7.1	0.51	409	254	0.64	26.6	13.21	1.9	0.0595	1.5	0.076	1.9	0.059	1.5	467.9	8.7	469.7	9.7
8.1	0.77	447	235	0.54	14.7	26.19	2.0	0.0577	3.0	0.038	2.0	0.058	3.0	239.7	4.7	240.5	5.1
9.1	0.36	749	666	0.92	51.3	12.53	1.9	0.0586	1.1	0.080	1.9	0.059	1.1	493.2	8.8	493.0	10.3
10.1	1.02	351	310	0.91	23.1	13.05	2.0	0.0612	1.6	0.077	2.0	0.061	1.6	471.2	9.2	474.3	10.7
11.1	1.46	275	202	0.76	18.0	13.16	2.0	0.0639	2.5	0.076	2.0	0.064	2.5	465.5	9.1	469.0	10.3
12.1	0.35	369	194	0.54	25.2	12.57	1.9	0.0606	1.6	0.080	1.9	0.061	1.6	491.8	9.2	491.4	10.0

注:误差为1σ; Pbc和Pb*分别代表普通铅和放射成因铅; ①为假设²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁴Pb/²³²Th年龄谱合校正普通铅, ②为假设²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁸Pb/²³²Th年龄谱合校正普通铅。

(1)第3岩性段酸性火山岩(H365-3): 锆石晶体较小,长约40~70 μm,宽约15~40 μm,长宽比为1.4:1~2.2:1,个别达3.2:1,大部分锆石较自形,多数呈中一短柱状,少数为粒状,个别长柱状,且具明显的振荡环带和扇形环带(图3a); Th/U比值0.43~0.89,平均0.625(表1),清楚地指示它们为岩浆成因锆石,未见继承核。

共分析了15个锆石颗粒,其中12个颗粒的分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图4a),²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为485.4 ± 3.9Ma,方差0.74,这一年龄解释为喀腊达坂铅锌矿酸性火

山岩的年龄。颗粒1.1的CL图像上可以看出这个锆石颗粒与本样品的大多数锆石明显不同,为一较大颗粒锆石晶体的一部分;颗粒5.1和12.1的CL图与大多数不合群,因此这3个颗粒未参加年龄计算。

(2)第4岩性段含矿酸性火山岩(H367-5): 锆石晶体中等,长约60~140 μm,宽约30~70 μm,长宽比为1.4:1~2.2:1,大部分锆石较自形,大多数呈中等柱状,且具明显的振荡环带和扇形环带(图3b); Th/U比值0.38~0.50,平均0.446(表1),清楚地指示它们为岩浆成因锆石,未见继承核。

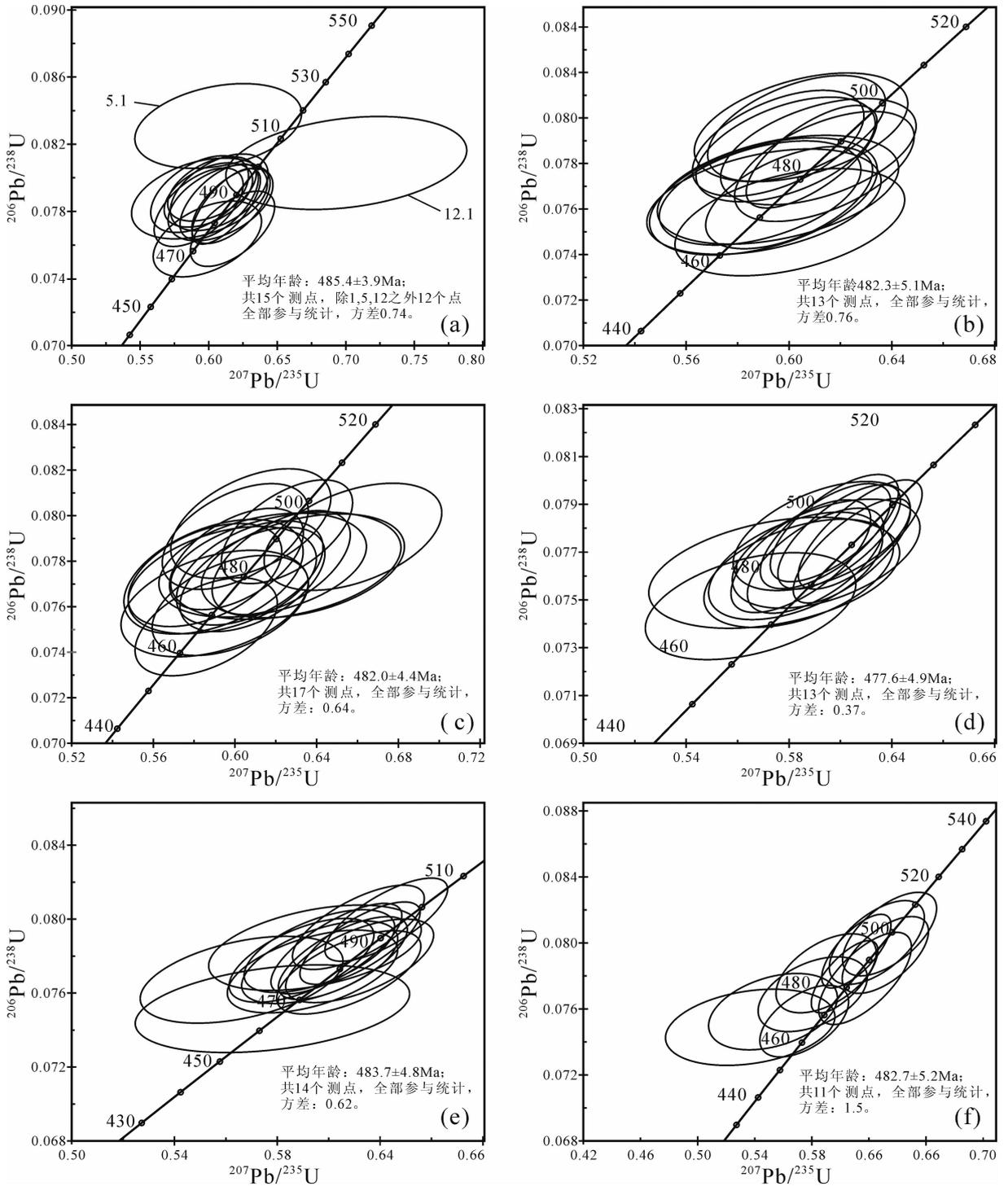


图 4 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon SHRIMP U-Pb concordia diagrams of the intermediate-acid volcanic rocks in Kaladawan area, Altun Mountains, NW China

(a)—H 365-3; (b)—H367-5; (c)—H365-12; (d)—H360-1; (e)—H361-1; (f)—H378-1

共分析了 13 个锆石颗粒,全部 13 个颗粒的分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图 4b),²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 482.0 ± 5.1Ma, 方差 0.76,这一年龄解释为喀腊达坂铅锌矿含矿酸性火山岩的年龄。

3.3 喀腊达坂铅锌矿中性火山岩年龄

样品产自第 5 岩性段中性火山岩(H365-12): 锆石晶体比较小,长约 60~90 μm,宽约 40~60 μm,长宽比为 1.4:1~1.8:1,大部分锆石较自形,呈中等一短柱状,且具明显的振荡环带和扇形环

带(图 3c);Th/U 比值 0.52~0.74,平均 0.645(表 1),清楚地指示它们为岩浆成因锆石,未见继承核。

共分析了 16 个锆石颗粒的 17 个分析点,全部 17 个点的分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图 4c), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $482.3 \pm 4.4\text{Ma}$,方差 0.64,这一年龄解释为喀腊达坂铅锌矿中性火山岩的年龄。

3.4 喀腊大湾铜锌矿酸性火山岩年龄

测试了 2 个样品,分别采自喀腊大湾铜锌矿东段酸性火山岩。

(1)酸性火山岩(H360-1):锆石晶体比较小,长约 $60\sim 80\ \mu\text{m}$,宽约 $40\sim 50\ \mu\text{m}$,长宽比为 1.2:1~1.8:1,大部分锆石较自形,多数呈中一短柱状,且具明显的振荡环带和扇形环带(图 3d);Th/U 比值 0.48~0.84,平均 0.63(表 1),清楚地指示它们为岩浆成因锆石,未见继承核。

共分析了 13 个锆石颗粒,全部 13 个颗粒的分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图 4d), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $477.6 \pm 4.9\text{Ma}$,方差 0.37,这一年龄解释为喀腊大湾铜锌矿酸性火山岩的年龄。

(2)酸性火山岩(H361-1):锆石晶体小一中等,长约 $70\sim 120\ \mu\text{m}$,宽约 $50\sim 70\ \mu\text{m}$,长宽比为 1.2:1~2.0:1,大部分锆石较自形,多数呈中一短柱状,且具明显的振荡环带和扇形环带(图 3e);Th/U 比值 0.49~0.67,平均 0.561(表 1),清楚地指示它们为岩浆成因锆石,未见继承核。

共分析了 14 个锆石颗粒,全部 14 个颗粒的分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图 4e), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $483.7 \pm 4.8\text{Ma}$,方差 0.62,这一年龄解释为喀腊大湾铜锌矿酸性火山岩

的年龄。

3.5 拉配泉酸性火山岩年龄

酸性火山岩(H378-1):锆石晶体中等,长约 $80\sim 110\ \mu\text{m}$,宽约 $50\sim 80\ \mu\text{m}$,长宽比为 1.2:1~1.8:1,大部分锆石较自形,多数呈短柱状,且具明显的振荡环带和扇形环带(图 3f);Th/U 比值 0.54~0.92,平均 0.726(表 1),清楚地指示它们为岩浆成因锆石,未见继承核。

共分析了 12 个锆石颗粒,其中 11 个颗粒的分析结果在谐和图上组成密集的一簇(图 4f), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $482.7 \pm 5.6\text{Ma}$,方差 1.5,这一年龄解释为喀腊大湾铜锌矿酸性火山岩的年龄。颗粒 8.1 测试点离边缘较近,而且该锆石颗粒发生裂纹,周边有不规则黑色斑带,可能部分受到后期构造或蚀变的少量影响而出现少量放射性 Pb 的丢失,其分析结果年龄偏小,未参加年龄计算。

以上显示,喀腊大湾、喀腊达坂及拉配泉地区中酸性火山岩形成年龄非常接近,属于同一期次火山喷发系列,时代为早奥陶世晚期。

4 喀腊大湾地区中酸性火山岩的构造环境

对喀腊大湾地区中基性火山岩,Cui Lingling et al. (2010)开展了岩石地球化学特征研究,认为具有岛弧火山岩的构造环境特点,本文主要根据中酸性火山岩的岩石化学探讨其构造环境。

4.1 主量元素地球化学特征

对喀腊大湾和喀腊达坂铅锌矿区的中酸性火山岩进行岩石地球化学分析,其主量元素测试结果见表 2。其中 4 个样品为英安岩,6 个样品为流纹岩。

表 2 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性火山岩主量元素测试结果(%)

Table 2 Major elements contents(%) of intermediate-acid volcanic rock samples from Kaladawan area, Altun Mountains

样品号	位置	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	CO ₂	LOI	TFeO	Na ₂ O+K ₂ O	Na ₂ O/K ₂ O	DI	δ
H351-5	喀腊大湾	73.55	12.31	0.45	3.09	0.36	2.13	0.20	5.66	0.22	0.08	0.05	1.46	0.09	1.35	3.49	5.86	28.30	84.30	1.12
H365-1	喀腊达坂	65.37	12.15	2.53	4.34	3.76	1.85	1.23	4.21	0.74	0.42	0.10	0.98	1.74	1.71	6.62	5.44	3.42	69.60	1.32
H365-3	喀腊达坂	68.61	15.21	2.35	1.44	0.54	0.97	5.40	2.04	0.25	0.04	0.05	1.90	0.52	2.23	3.56	7.44	0.38	84.70	2.16
H365-4	喀腊达坂	72.86	13.67	0.88	1.77	0.22	1.10	2.27	4.64	0.21	0.01	0.05	1.14	0.26	1.14	2.56	6.91	2.04	88.80	1.60
H365-10	喀腊达坂	75.60	11.03	2.24	0.63	0.24	0.42	0.81	5.09	0.53	0.01	0.05	1.18	0.06	2.08	2.65	5.90	6.28	92.60	1.07
H365-12	喀腊达坂	61.66	12.56	3.78	6.72	1.39	3.31	0.20	4.00	1.19	0.38	0.32	3.10	0.21	2.88	10.12	4.20	20.00	64.80	0.95
H367-5	喀腊达坂	72.62	12.54	1.09	1.94	0.61	0.48	5.45	3.00	0.21	0.07	0.05	1.80	0.30	0.99	2.92	8.45	0.55	90.40	2.41
H367-6	喀腊达坂	76.99	11.28	0.58	0.95	0.57	0.30	5.02	2.48	0.15	0.02	0.05	0.60	0.47	0.81	1.47	7.50	0.49	93.30	1.65
H375-1	喀腊大湾	65.29	17.43	3.25	0.68	0.36	0.42	0.42	9.32	0.17	0.02	0.05	1.02	0.17	1.91	3.6	9.74	22.19	91.50	4.26
K136-1	喀腊大湾	66.60	16.13	1.94	2.96	0.40	1.38	2.84	5.45	0.60	0.07	0.12	1.16	0.20	1.03	4.71	8.29	1.92	84.10	2.91

注:实验数据由中国地质科学院国家地质实验测试中心测定。

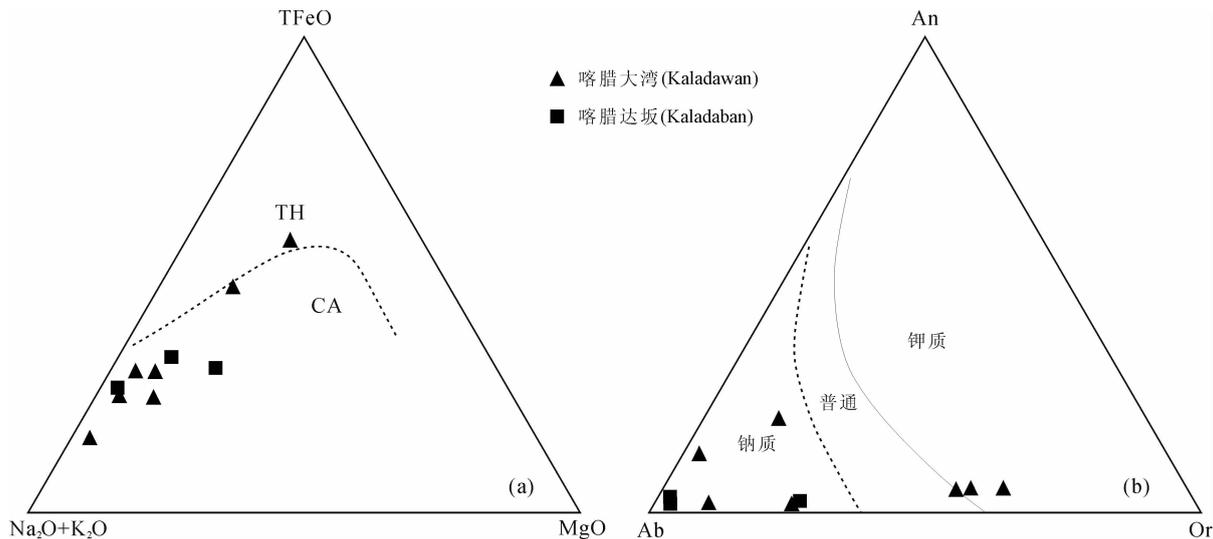


图 6 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性火山岩 FAM 图解(a)和 An-Ab-Or 图解(b)(底图据 Le Maitre, 1984)

Fig. 6 The FAM diagram(a) and An-Ab'-Or diagram(b) of intermediate-acid volcanic rocks in Kaladawan area, Altun Mountains(after Le Maitre, 1984)

表 3 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性火山岩稀土元素测试结果 ($\times 10^{-6}$)

Table 3 Rear earth elements contents ($\times 10^{-6}$) of intermediate-acid volcanic rock samples from Kladawan, Altun Mountains

样品号	位置	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	LaN/YbN	δEu
H351-5	喀腊大湾	41.7	97	10.1	39.4	9.18	1.24	9.05	1.59	10.4	2.32	6.91	1.03	6.81	1.09	63.6	238.27	198.62	39.65	5.01	4.14	0.41
H365-1	喀腊达坂	31.1	70	9.55	41.0	10.1	3.29	10.4	1.24	10.2	2.20	6.59	1.04	7.40	1.35	55.2	205.46	165.04	40.42	4.08	2.84	0.98
H365-3	喀腊达坂	68.3	129	15.8	59.0	11.7	1.42	11.5	1.96	13.0	2.84	8.46	1.28	8.23	1.24	89.8	333.73	285.22	48.51	5.88	5.61	0.37
H365-4	喀腊达坂	58.0	129	13.1	47.8	10.4	1.21	9.72	1.65	10.5	2.28	6.63	1.02	6.64	1.01	63.7	298.96	259.51	39.45	6.58	5.90	0.37
H365-10	喀腊达坂	18.4	38.8	4.33	17.2	5.16	1.37	9.80	2.18	16.6	3.79	11.1	1.59	9.67	1.39	134	141.38	85.26	56.12	1.52	1.29	0.59
H365-12	喀腊达坂	64.7	130	16.6	61	12.8	2.42	10.2	1.49	8.87	1.92	5.8	0.88	5.88	0.88	52.8	323.44	287.52	35.92	8.00	7.44	0.65
H367-5	喀腊达坂	55.4	125	13.9	54.7	13.0	2.22	13.4	2.29	14.9	3.25	9.75	1.50	9.85	1.56	97.9	320.72	264.22	56.5	4.68	3.80	0.51
H367-6	喀腊达坂	49.0	105	11.6	44.2	9.97	1.20	10.1	1.54	9.28	2.04	6.12	0.94	6.41	1.01	57.4	258.41	220.97	37.44	5.90	5.17	0.37
H375-1	喀腊大湾	46.5	96.7	8.08	25.2	4.14	0.41	3.65	0.57	3.75	0.88	2.85	0.47	3.45	0.59	23.3	197.24	181.03	16.21	11.17	9.11	0.32
K136-1	喀腊大湾	46.2	60.2	9.44	35.5	6.61	1.46	6.53	1.10	6.76	1.40	4.57	0.64	4.55	0.69	43.9	185.65	159.41	26.24	6.08	6.86	0.68

注:实验数据由中国地质科学院国家地质实验测试中心测定。

表 4 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性火山岩微量元素测试结果 ($\times 10^{-6}$)

Table 4 Trace elements contents ($\times 10^{-6}$) of intermediate-acid volcanic rock samples from Kaladawan, Altun Mountains

序号	样品号	位置	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Zr/Nb	Th/Ta	La/Nb	Nb/Ta
1	H351-5	喀腊大湾	3.3	64.6	625.0	20.9	187.0	12.9	1.7	33.1	17.1	4.7	41.7	1.3	19.0	6.3	122.0	29.9	10.2	2.0	5.1
2	H365-1	喀腊达坂	45.2	176.0	1691.0	22.4	831.0	25.7	1.2	71.0	8.0	2.9	28.7	1.9	17.8	12.0	819.0	75.5	6.5	1.4	18.1
3	H365-3	喀腊达坂	153.0	65.2	543.0	24.6	1312.0	11.8	1.9	11.8	28.3	12.4	148.0	3.6	72.1	48.6	79.3	22.1	15.3	2.8	13.3
4	H365-4	喀腊达坂	64.3	111.0	461.0	21.9	641.0	10.4	1.7	38.7	24.5	7.9	62.5	1.9	33.8	8.9	66.0	21.1	14.5	2.7	5.5
5	H365-10	喀腊达坂	27.0	140.0	576.0	26.9	407.0	11.4	1.4	52.7	17.3	7.4	37.7	1.0	17.7	12.8	38.8	21.5	12.7	0.7	18.6
6	H365-12	喀腊达坂	3.7	89.7	443.0	16.1	347.0	8.7	1.1	45.0	14.7	4.2	71.7	8.9	35.6	44.2	1412.0	27.5	13.4	4.0	14.6
7	H367-5	喀腊达坂	97.8	37.8	771.0	25.7	815.0	16.2	1.9	12.2	24.4	6.4	43.0	0.8	20.0	6.6	112.0	30.0	12.6	2.2	5.9
8	H367-6	喀腊达坂	180.0	45.9	400.0	16.9	971.0	9.2	1.5	24.4	21.8	5.9	17.4	0.9	7.5	5.1	94.0	23.7	14.5	2.9	5.0
9	H375-1	喀腊大湾	10.2	58.6	545.0	35.3	132.0	12.5	2.3	27.0	50.2	14.1	21.2	2.6	12.4	6.9	29.8	15.4	21.5	1.3	15.1
10	K136-1	喀腊大湾	53.6	74.9	393.0	17.6	1228.0	8.7	1.3	4.6	19.5	6.0	3.4	6.1	1.4	17.4	70.7	22.3	14.9	2.6	13.4

样品稀土总量 ΣREE 高, 在 $141.38 \times 10^{-6} \sim 333.73 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 250.33×10^{-6} ; 轻重稀土比值变化大, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 介于 $1.52 \sim 11.17$ 之间(平均 5.89), La_N/Yb_N 为 $1.29 \sim 9.11$ 之间(平均 5.22), 反映了轻重稀土分异较弱, 仅样品 H375-

1 和 H365-12 表现出极强轻重稀土分异, 而 H365-10 轻重稀土分异最弱(表 3)。除 H365-1 外, δEu 值介于 $0.32 \sim 0.68$ 之间, 平均 0.43, 反映了比较强烈的 Eu 负异常。球粒陨石标准化配分曲线为轻稀土弱富集右倾斜“V”型(图 7a)。说明在熔融过程中斜

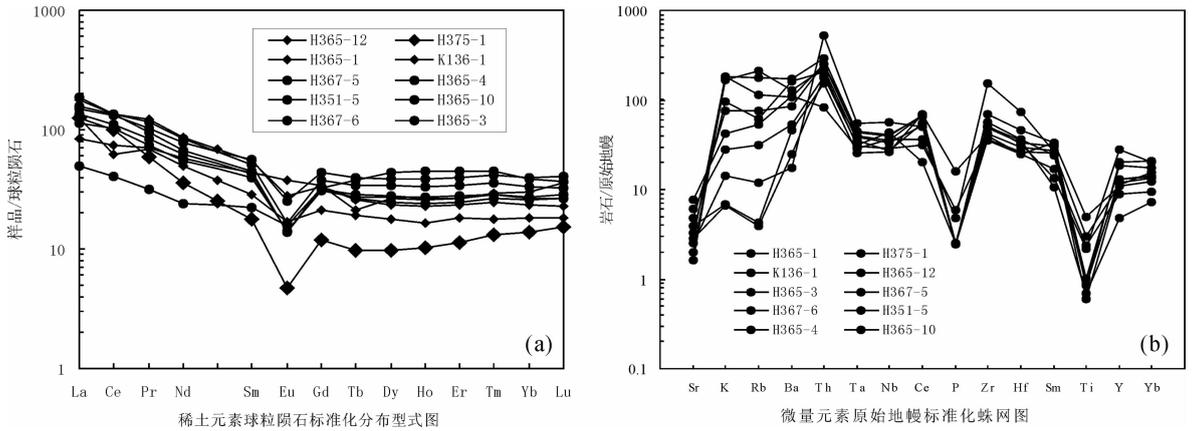


图7 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性火山岩稀土元素球粒陨石标准化分布图(a)和微量元素原始地幔标准化比值蛛网图(b) (底图据 Qiu Jiaxiang et al., 1991 和 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns(a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergram(b) of intermediate-acid volcanic rocks in Kaladawan area, Altun Mountains(after Qiu Jiaxiang et al., 1991 and Sun et al., 1989)

长石呈稳定相存在或岩浆演化过程发生较强的斜长石分离结晶(Sun et al., 1989)。

应该注意的是,喀腊大湾地区的英安岩(H365-1、H365-12、H375-1 和 K136-1)和流纹岩(H351-5、H365-3、H365-4、H365-10、H367-5 和 H367-6 共 6 个样品)稀土总量相近,但是却出现英安岩样品的重稀土总量低于流纹岩而且英安岩总体上表现出相对较高的轻重稀土分异,说明两者在物源上可能存在一定差异,或者壳源物质混入程度存在差异。因此流纹岩较强的 Eu 负异常不一定是斜长石结晶分异的结果,可能是斜长石在熔融过程中处于稳定残留相引起的。

在微量元素方面,研究区中酸性火山岩显示了较为一致的分布模式(图 7b): LILE 相对 HFSE 富集,具有明显 Nb、Ta、P、Ti、Sr 相对亏损和 K、Rb、Ba、Th、Zr、Ce、Sm 相对富集,表现出形成于俯冲带环境的钙碱性火山岩的微量元素地球化学特征。但是流纹岩(H351-5、H365-3、H365-4、H365-10、H367-5 和 H367-6 共 6 个样品)相对英安岩(其余 4 个样品)Nb、Ta 亏损和 Ba、Th 富集程度减弱,而 P、Ti 亏损增强,可能反映了陆壳物质对岩浆源区的影响作用增强,这与 Pb 元素($2.66 \times 10^{-6} \sim 57.2 \times 10^{-6}$, 平均 25.5×10^{-6})在岩石中富集相吻合,因为陆壳是强烈富集 Pb 的(Sun et al., 1989)。

5 中酸性火山岩形成的构造环境

5.1 火山岩的构造环境

前述研究显示,喀腊大湾地区早古生代中酸性火山岩以英安岩和流纹岩为主,有极少量安山岩和

粗面英安岩,在地球化学上属于亚碱性系列钙碱性火山岩套。右倾轻稀土富集分配模式和 K、Ba、Th (U)、Pb、Zr 富集以及 Nb(Ta)、P、Ti 亏损的稀土、微量元素特征具有典型的陆缘弧岩浆岩特征(Atherton et al., 1979)。野外地质调查发现大量伴生的同成分中酸性熔结火山碎屑岩、熔结火山角砾岩、晶屑(岩屑、晶屑)凝灰岩等,说明具有强烈的火山爆发活动,且岩浆活动具有较多的地壳组分参与,这与活动大陆边缘和岛弧环境的火山岩组合及火山喷发特点具有一致性(Lu Fengxiang et al., 2002),因此从岩石组合、喷发特点以及稀土、微量元素特征来看,可能形成于活动大陆边缘(或陆缘弧)的大地构造环境。

微量元素地球化学行为在岩浆演化过程中具有很强的规律性,并且受后期热事件影响较小,因而其丰度组合、元素比值及演化特征对于探讨岩浆成因、恢复和重溯古火山事件发生的构造环境及动力机制具有重要意义(Zhao Zhenhua et al., 2004)。区内火山岩 Zr/Nb 比值在 15.4~30.0 之间(H365-1 除外),落在岛弧火山岩的 Zr/Nb 比值范围内(一般在 10~60 范围内变化)。Th/Ta 比值为 6.45~21.5,与活动大陆边缘火山岩特征(Th/Ta=6~20)基本一致,个别样品偏向洋内岛弧火山岩(Th/Ta 略大于 20)(Michael et al., 2000)。在 Th/Ta-Yb 和 $\omega(\text{Ta})/\omega(\text{Yb})-\omega(\text{Th})/\omega(\text{Yb})$ (Michael et al., 2000)构造环境判别图解上,样品主要落在活动大陆边缘区(active continental margins)和洋内岛弧区(oceanic arcs)(图 8a, 8b),但是落在洋内岛弧区的样品基本位于与活动大陆边缘区的分界上,可能反

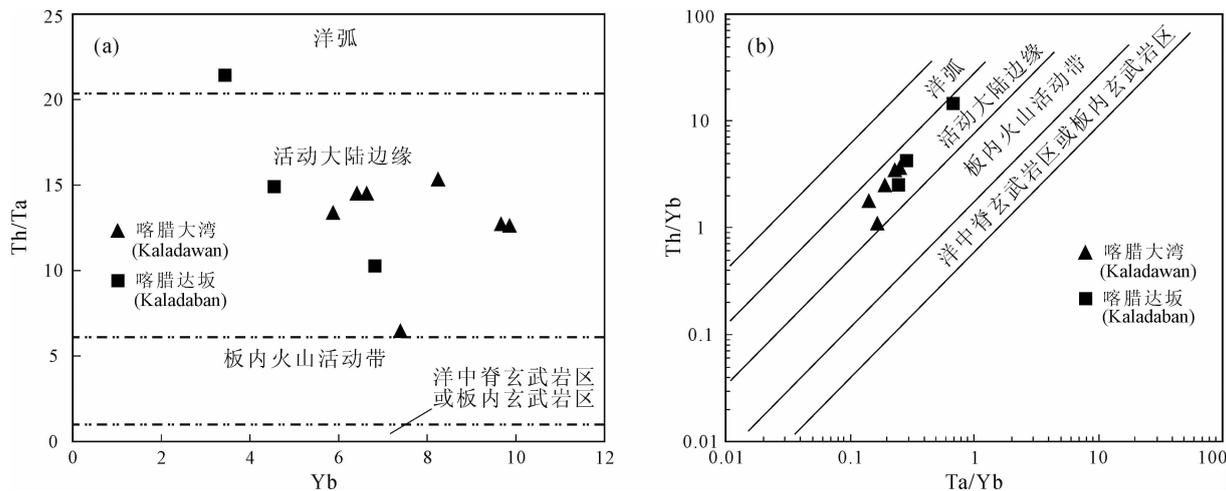


图8 阿尔金山喀腊大湾地区火山岩 Yb-Th/Ta 图解(a)和 Ta/Yb-Th/Yb 图解(b)(底图据 Michael et al., 2000)

Fig. 8 Tectonic discrimination diagram of Yb-Th/Ta (a) and Ta/Yb-Th/Yb (b) for the volcanic rocks in Kaladawan, Altun Mountains(after Michael et al., 2000)

映了洋壳物质的影响作用比较明显。

同时,研究区内以高钾(K_2O 为 2.27%~5.45%)、高碱(Na_2O+K_2O 为 6.91%~9.74%, Na_2O/K_2O 为 0.48~2.64)、贫钛等为特征的富钾一钾玄质火山岩(其中 K136-1、H367-5、H367-6、H365-3 和 H365-4 样品最为明显等)(表 2)。该类岩石具有特殊成因意义,其形成与俯冲消减作用密切相关,且以产在岛弧环境最为常见(Defand et al., 1990; Kay, 1978; Muller et al., 1992)。通常认为俯冲消减带内钾玄质火山岩的出现是大洋岩石圈俯冲结束,陆内会聚开始的岩石学标志(Deng Jinfu et al., 1996),在局部伸展机制下岛弧下部或弧后岩石圈减薄,减压作用导致下部软流圈地幔低程度部分熔融的结果或者上升的软流圈地幔加热并诱发岩石圈地幔(或角闪一榴辉岩岩相下地壳)发生部分熔融的结果(Deng Jinfu et al., 1996; Muller et al., 1992),一般分布弧后靠近大陆板内方向。产于岛弧环境下的钾质一钾玄质火山岩具有明显富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),亏损 Ta、Nb 和 Ti 等不相容元素的特征(Defand et al., 1996; Muller et al., 1992),这与研究区内火山的微量、稀土元素特征吻合。在横穿岛弧或活动大陆边缘的剖面上,随俯冲深度增加,由大洋向大陆方向岛弧火山岩显示微量元素 $K \rightarrow Rb \rightarrow Sr \rightarrow Ba \rightarrow Cs \rightarrow P \rightarrow Pb \rightarrow U \rightarrow Th \rightarrow REE$ 等显示逐渐增加的趋势(Zhao Zhenhua et al., 2004)。此外研究区北部的中酸性火山岩具有埃达克质火山岩的一些特点(Li Songbin et al., 2013),微量元素自北向南总体上呈现出相似的规律,反映了喀腊大湾地区早古生代的

中酸性火山岩形成于与俯冲有关的活动大陆边缘弧环境,其形成与阿尔金北缘红柳沟一拉配泉地区早古生代的洋壳向南俯冲消减有关。

在喀腊大湾地区南北方向剖面上,反映俯冲极性的不同性质火山岩、蛇绿岩套、双变质带分布以及铁矿物类型等方面均呈规律性变化。中酸性岛弧火山岩主要分布于南侧,而中基性火山岩(包括枕状玄武岩)主要出露于北侧;以超基性侵入岩、堆晶辉长岩等洋壳残留主要出露于北部,北部变质作用偏高压低温(蓝片岩带)为代表,而南部则出现较高温的堇青石、石榴石片岩;在铁矿物方面,北部白尖山一带以赤铁矿为主,少量微晶磁铁矿,到八八铁矿带以中一粗晶磁铁矿为特征,再向南到喀腊大湾铜锌矿区,出现高温镜铁矿,据此可以认为喀腊大湾地区南部为偏岛弧构造环境、北侧为有限洋盆构造环境,洋壳俯冲是自北向南的。

5.2 火山成因及源区特征

喀腊大湾地区的中酸性火山岩总体上具有高 SiO_2 、富碱(Na_2O+K_2O)、低钛、低镁铁的特征,化学成分上相当于 TAS 图解(Middlemost, 1994)中花岗闪长岩、花岗岩、石英二长岩和闪长岩。CIPW 标准矿物计算得到英安岩和流纹岩的 A/CNK(或称 ASI)分别介于 0.8~1.4 和 1.03~1.30 之间,且多数样品中具有标准矿物刚玉分子,含量介于 0.43%~6.96%,表明这是一套准铝质一强过铝质岩石。前人研究认为花岗质岩浆的类型可以根据主要造岩元素 Ca、Na、K 的质量分数(或分子数)加以区分,提出含铝质数 $ASI[Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ 摩尔分数比]大于 1.1 为强过铝质,属沉积岩原岩 S 型

花岗岩类, ASI 小于 1.0 为准铝质, 属火山岩源岩 I 型花岗岩类; ASI 介于 1.1 与 1.0 之间为弱过铝质, 属 S 型和 I 型的过渡类型 (Wang Dezi et al., 2007), 因此喀腊大湾地区的中酸性火山岩具有 I-S 型花岗质岩浆的特征, 具有多源性。其中喀腊大湾北部的 5 件英安岩样品 $A/CNK < 1$ 且标准矿物计算不出现刚玉, 表现出准铝质 I 型花岗质岩浆的性质, 南侧两件流纹岩样品 $A/CNK \geq 1.1$, 表现出强过铝质 S 型花岗质岩浆的性质; 喀腊大湾和白尖山的样品除 H365-1、K174-1 外, 其余样品 $A/CNK \geq 1$, 在 1.0~1.494 之间, 标准矿物计算出现刚玉, 含量 0.43%~5.21%, 表现出弱过铝质—强过铝质 S 型和 I-S 过渡型花岗质岩浆的性质, 样品 H365-1、K174-1 表现出 I 型花岗质岩浆的性质。以上分析表明喀腊大湾地区的中酸性火山岩自北向南总体具有从火山源岩 I 型花岗质岩浆向沉积岩源岩 S 型花岗质岩浆的特征。此外研究区内中酸性火山岩的 $Mg^{\#} < 0.53$ [$Mg^{\#} = 100MgO / (FeO_{tot} + MgO)$ (mol. %)] (个别除外), 说明不可能是基性火山岩结晶分异的结果, 因此可能来自大陆地壳的部分熔融。但是研究区内火山岩的 $Mg^{\#}$ 表现出明显的极性特征, 北部的火山岩样品 $Mg^{\#}$ 较高, 在 0.41~0.53 之间, 而南部火山岩样品 $Mg^{\#}$ 较低, 在 0.17~0.39 之间 (个别除外), 也印证了它们源区的不同。

岩浆岩中氧化物的比值可以反映壳源花岗质岩浆的源区, 其中 K_2O/Na_2O , $A/MF = Al_2O_3 / (MgO + FeO_{tot})$ 和 $C/MF = CaO / (MgO + FeO_{tot})$ 的指示作用比较明显。一般认为由变质中基性火山岩 (玄武岩、英云闪长质片麻岩) 部分熔融形成的熔体具有高的 C/MF 值, 低的 K_2O/Na_2O 和 A/MF 值, 而由变质碎屑岩 (变质泥岩、杂砂岩) 部分熔融形成的熔体具有高的 K_2O/Na_2O 、 A/MF 值, 低的 A/MF 值 (Alther et al., 2000)。在 Alther et al. (2000) 提出的 $C/MF-A/MF$ 源岩判别图解上, 喀腊大湾地区南部的样品主要落在变质泥质岩部分熔融区, 而北部大平沟和白尖山的样品主要落在变质基性岩部分熔融区, 此外有一部分样品落在变质泥质岩部分熔融区与变质基性火山岩部分熔融区之间 (图 8), 反映了研究区内火山岩源区的多样性。北部以英安岩为主, 源自基性火山岩部分熔融, 南部以流纹岩为主, 源自变质泥质岩的部分熔融, 还有一部分火山岩是变质泥质和变质基性火山岩混合部分熔融的结果。这与上述运用铝饱和指数 A/CNK 判别认为喀腊大湾地区中酸性火山岩主要为沉积源岩和火山岩源岩

的准铝质—过铝质火山岩系列的结论一致。

5.3 构造演化时限讨论

不少学者在阿尔金北缘红柳沟—拉配泉构造带识别出了早古生代的蛇绿混杂岩, 发现其中的基性火山岩具有 MORB 和 OIB 组合 (Wu Jun et al., 2002), 通过同位素测年获得恰什坎萨依地区枕状熔岩 508Ma (Liu Liang et al., 1999)、贝壳滩 OIB 型玄武岩 524Ma (Che Zicheng et al., 2002) 的 Sm-Nd 等时线年龄以及恰什坎萨依 OIB 型枕状熔岩 448 Ma 的 TIMS 锆石表面年龄 (Xiu Qunye et al., 2007)、米兰红柳沟 MORB 型辉绿岩墙 479Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 (Yang Jingsui et al., 2008) 和阿克赛青崖子 MORB 型辉长岩 521Ma 的锆石 SHRIMP 年龄 (Zhang Zhicheng et al., 2009), 并认为其具有俯冲带上叠型 (SZZ 型) 蛇绿岩套的特征 (Yang Jingsui et al., 2008; Zhang Zhicheng et al., 2009), 这些同位素年龄代表了红柳沟—拉配泉 (北阿尔金地区) 洋壳的形成年龄, 这说明了阿尔金北缘地区在早中寒武世—中晚奥陶世存在一定规模的洋盆, 但是这些年龄的时间跨度达到 50~70Ma, 可能代表了阿尔金北缘地区早古生代洋盆的存留时间。

阿尔金北缘地区红柳沟—拉配泉不仅存在新元古代晚期—早古生代蛇绿混杂岩带, 而且存在高压—超高压变质岩带。Liu Liang et al. (1999) 和 Zhang Jianxin et al. (2007) 在阿尔金北缘红柳沟—拉配泉构造带的中西部的贝壳滩东、红柳泉、恰什坎萨依沟中南段识别出高压变泥质岩带和低温榴辉岩、蓝片岩带。前者与石榴云母石英片岩、片麻岩及不纯大理岩伴生, 后者与泥质片岩、钙质片岩和石英片岩等一起构成了 HP/LP 变质带。它们或呈构造岩片产出或与围岩互层产出, 与蛇绿岩带呈断层接触。Liu Liang et al. (1999) 获得了贝壳滩东高压变泥质岩中多硅白云母 574.7 ± 2.5 Ma 的 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 高温坪年龄和 572.6 ± 5.5 Ma 等时线年龄以及 $T = 550 \pm 30^\circ C$, $P = 1.4 \sim 2.0$ GPa 的峰期变质条件, 同时获得了两个 527.4Ma 和 479.8Ma 低温坪年龄, 认为是后期热事件的影响, 可能代表了降压过程的退变质作用。Zhang Jianxin et al. (2007) 则获得了红柳泉榴辉岩中多硅白云母 512 ± 3 Ma 的 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 高温坪年龄和 513 ± 5 Ma 的等时线年龄 (榴辉岩形成年龄), 蓝片岩中钠云母 491 ± 3 Ma 的 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 高温坪年龄和 497 ± 10 Ma 的等时线年龄, 得到峰期变质条件 $T = 430 \sim 540^\circ C$, $P = 2.0 \sim 2.5$ GPa, 同时根据榴辉岩围岩蓝片岩石榴石中绿辉石包体的特征

以及钠云母切割穿插石榴石及蓝闪石的岩相学特征认为,蓝片岩可能为榴辉岩退变质的产物,其中钠云母的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄可能代表了后期折返过程中的退变质年龄。Liu Liang et al. (1999)和 Zhang Jianxin et al. (2007)的研究成果显示这些高压—超高压变质岩具有顺时针陡倾斜的 $P-T-t$ 轨迹,说明它们的形成与活动大陆边缘板块的深俯冲、碰撞作用密切相关。因此高压—超高压变质岩带的出现指示在晚元古代晚期—早古生代,阿尔金北缘地区处于活动大陆边缘环境俯冲消减带的环境,但是得到的两组峰期变质年龄相差近 60Ma,与上述蛇绿岩混杂岩带中代表洋壳基性岩的年代跨度 50~70Ma 基本一致,可能说明了阿尔金北缘地区至少在新元古代晚期已经存在一定规模的洋盆,并且洋壳的俯冲消减作用从新元古代晚期开始一直持续到了中晚奥陶纪,但是近于一致的退变质年龄可能说明了在晚寒武世—早奥陶世 479~491Ma 该地区的洋盆已经闭合并发生陆块的碰撞作用,紧随其后发生了深俯冲洋壳的快速折返。

Hao Jie et al. (2006)获得红柳沟—拉配泉蛇绿混杂岩变质基质绢云母石英片岩 $455 \pm 2\text{Ma}$ 和 $450 \pm 11\text{Ma}$ 的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 高温坪年龄和等时线年龄,属于晚奥陶世,代表了蛇绿混杂岩变质基质岩系的变质年龄,但明显晚于高压—超高压变质岩的 479~491Ma 退变质年龄(深俯冲洋壳的折返年龄)(Liu Liang et al., 1999; Zhang Jianxin et al., 2007),但是早于碰撞后伸展条件的 S 型花岗岩的年龄(410~430Ma)(Han Fengbin et al., 2012),指示了红柳沟—拉配泉地区的蛇绿岩最终构造就位时间。

本文的中酸性火山岩的年龄在 477.6~485.4Ma 之间,与上述蛇绿岩混杂岩带中代表洋壳基性岩的年代跨度的上限比较接近,而且以具有 I 型岩浆源为特点,代表了与洋壳的俯冲消减—碰撞作用有关的火山岩类型,其时限与洋壳生长后期一致。

综观阿尔金北缘红柳沟—拉配泉地区的岩浆活动特征,可以比较清楚地画出一条近东西向展布的中酸性岩浆岩带,西自红柳沟,依次经过以恰什坎萨依、巴什考供盆地边缘、阔什布拉克、冰沟、卓阿布拉克、大平沟、喀腊大湾、白尖山,东至拉配泉地区,其中侵入岩发育有闪长岩—花岗闪长岩—灰白色(斑状、似斑状)花岗岩—粉红色、红色(斑状)花岗岩—花岗伟晶岩等中酸性岩体或杂岩体,火山岩有安山岩、英安岩、流纹岩及火山碎屑岩。这些中酸性岩浆

岩具有钙碱性—高钾钙碱性准铝质—过铝质 I 型俯冲—同碰撞和 S 型同碰撞—碰撞后花岗岩组合的特点,其中 I 型俯冲—同碰撞中酸性侵入岩锆石 SHRIMP 年龄为 477~488Ma (Han Fengbin et al., 2012),部分延续到 467 Ma,而 S 型同碰撞—碰撞后中酸性侵入岩锆石 SHRIMP 年龄在 417~431Ma,部分较老的达到 446Ma (Han Fengbin et al., 2012; Hao Jie et al., 2006; Zhang Zhanwu et al., 2012; Wu Cailai et al., 2005, 2007; Qi Xuexiang et al., 2005; Chen Xuanhua et al., 2003)。该中酸性岩浆岩带的空间分布特征及形成时代与前述蛇绿岩套代表的洋壳的成岩年龄及深俯冲高压—超高压变质岩的变质年龄具有很好的演化时序性,说明它们是同一地球动力学背景下经历相应的构造演化阶段所形成的。

因此喀腊大湾地区中酸性火山岩主要形成于早古生代奥陶纪早期(早奥陶世—中奥陶世早期),年龄在 477.6~485.4Ma 之间,并且形成于活动大陆边缘(岛弧)构造环境。这一时期正是阿尔金北缘红柳沟—拉配泉裂谷(有限洋盆)洋壳自北向南俯冲消减后期,洋盆闭合过程中同碰撞阶段的产物。

5.4 与北祁连早古生代构造演化的对比

本文对喀腊大湾地区早古生代(477~485Ma)中酸性岩浆喷发活动的确认,一方面对喀腊大湾地区或阿尔金山北缘地区构造环境的确定提供了必要的地质依据,即中酸性火山岩的时代和地球化学特征所代表的岛弧构造环境,结合本区中基性火山岩(Hao Ruixiang et al., 2013)、蛇绿岩(Liu Liang et al., 1998, 1999)和高压变质带(Zhang Jianxin et al., 2007),表明阿尔金北缘地区在早中寒武世—中晚奥陶世存在一定规模的洋盆。更重要的方面在于所确定的构造环境与北祁连山具有相似性,为阿尔金走滑断裂位移距离的确认提供进一步证据。

Zhang Qi et al. (1997)在对北祁连蛇绿岩进行系统研究基础上最早提出北祁连洋,之后(Zhang Qi et al., 2000)又对北祁连蛇绿岩的特点做了进一步论述,认为北祁连洋属于科迪勒拉型大洋盆。Zuo Guochao et al. (2002)对北祁连造山带中—西段陆壳残块群的构造—地层特征进行了研究,认为北祁连地区构造演化可以划分为两大部分即北祁连西段和北祁连东段,北祁连西段在震旦纪至奥陶纪经历了裂谷—海沟—岛弧带—俯冲的构造演化,也就是碰撞前到碰撞过程的作用。Wu Cailai et al. (2010)对北祁连西段多个岩体进行研究过后得到一系列岩

体的地球化学数据,推断北祁连岩浆活动也经历了 501~512Ma、463~477Ma、424~435Ma 三期重要岩浆作用,为具有火山岛弧性质的花岗岩,与喀腊大湾地区的中酸性侵入岩的时限(Han Fengbin et al., 2012)非常接近,构造环境及演化历史也非常相似。

对于北阿尔金地区(红柳沟—拉配泉带)成矿带与北祁连山成矿带构造环境的相似性问题, Xu Zhiqin et al. (1999)较早对阿尔金走滑断裂两侧的地质体进行了对比研究,认为阿拉善地块对应敦煌地块,北祁连俯冲杂岩带对应北阿尔金杂岩带,中祁连地块对应中阿尔金地块,柴达木盆地北缘俯冲杂岩带对应南阿尔金杂岩带。本文作者前期(Chen bailin et al., 2010)从成矿带对比角度分析了阿尔金北缘与北祁连的相似性, Meng Fancong et al. (2010)认为北阿尔金 OIB 性质的枕状玄武岩形成于弧后盆地环境,与 Feng Yimin et al. (1995)、Qian Qing et al. (2001)和 Shi Rendeng et al. (2004)描述的北祁连玄武岩形成构造环境一致,本文及相关研究确定的阿尔金北缘地区早古生代沟-弧-盆体系与北祁连相同,或者说为同一古洋盆。上述研究均支持了阿尔金走滑断裂的位移为 400km 左右(或 350~400km)的小位移观点,而认为阿尔金断裂 500~700km,甚至 900~1200km 的观点是值得商榷的。

同时,从蛇绿岩的特点来看,阿尔金北缘地区与 Zhang Qi et al. (2000)描述的北祁连地区非常相似,由此推测阿尔金北缘地区早古生代的古洋盆还应该是比较大的规模,而不是从前认为的有限规模的弧后盆地或裂谷。

6 结论

阿尔金山东段喀腊大湾地区位于北东向阿尔金走滑断裂北侧与东西向阿尔金北缘断裂所夹持的区域,是区域上红柳沟—拉配泉构造带的中段。该区广泛发育火山—沉积岩系,前人将其确定为中元古代。本文运用锆石 SHRIMP U-Pb 方法对区内火山—沉积岩系中的中酸性火山岩进行测年,获得 477~485Ma 的年龄,确认喀腊大湾地区早古生代中酸性岩浆喷发活动的存在。同时根据岩石地球化学研究,显示这套火山岩具有活动大陆边缘(岛弧)构造环境,其岩浆源具有 I 型及 I 与 S 过渡类型特点。结合前人对红柳沟—拉配泉一带的蛇绿混杂岩、高压变质泥岩、榴辉岩、中酸性侵入岩等相关年代资料及构造环境示踪,作者认为喀腊大湾地区中

酸性火山岩形成于活动大陆边缘(岛弧)大地构造环境,其时限与蛇绿混杂岩的末期非常接近,代表了洋壳俯冲碰撞过程中形成的同碰撞中酸性火山岩。据此可以将区域上红柳沟—拉配泉一带的构造演化划分为洋壳扩张期(晚元古代末—寒武纪,蛇绿混杂岩年龄 510~580Ma,但扩张起始会早一些)、洋壳板块俯冲碰撞期(早奥陶世—中奥陶世早期,中酸性岩浆岩(包括侵入岩和火山岩)年龄为 477~488 Ma(部分花岗岩年龄延迟到 467Ma 左右),以及高压变质岩的退变质年龄 479~491Ma),碰撞后伸展期(晚奥陶世—志留纪,蛇绿混杂岩变质基质岩系的变质年龄 450~455Ma,代表蛇绿混杂岩最后就位,碰撞—碰撞后 S 型碱性花岗岩年龄 417~431Ma,代表碰撞后伸展构造环境)三个演化阶段。

References

- Alther R., Holl A., Hegner E., Langer C. and Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50: 5173.
- Atherton M P and Tarney J. 1979. Origin of Granite Batholiths: Geochemical Evidence. Mineralogical Society. *Geochemistry Group*, 1~148.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai province. 1981. Report on the Regional Geological Surveying at the Eboliang, scale 1: 20,000 (in Chinese without English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1981. Report on the Regional Geological Surveying at the Su'erkuili and Bashikaogong, scale 1: 20,000 (in Chinese without English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. Regional geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House, 1~941 (in Chinese with English abstract).
- Che Zicheng, Liu Liang and Luo Jinhai. 2002. Tectonics of China and adjacent region. Beijing: Science Press, 207~369 (in Chinese without English abstract).
- Chen Bailin, Jiang Rongbao, Li Li, Chen Zhengle, Qi Wanxiu, Liu Rong, Cui Lingling and Wang Shixin. 2009. The discovery of Iron ore zones in Kaladawan area within the eastern part of the Altun Mountains and its Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(2): 143~154 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Cui Lingling, Bai Yanfei, Wang Shixin, Chen Zhengle, Li Xuezhong, Qi Wanxiu and Liu Rong. 2010. A determining on displacement of the Altun Tagh sinistral strike-slip fault, NW China: New evidence from the tectonic metallogenetic belt in the eastern part of Altun Tagh Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3387~3396 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bailin, Zhao Hengle, Ma Yu zhou, Yang feng, Wang Shixin,

- Chen Zhengle, Qi Wanxiu, Liu Rong, Jiang Rongbao and Li Li. 2012. A preliminary discussion on genesis and structural control of Abei silver-lead deposit in eastern Altun Mountains. *Mineral Deposits*, 31(1): 13~26 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bolin, Cui Lingling, Chen Zhengle. 2014. EBSD Fabrics Analysis of Deformed Rocks from Kaladawan Area, Altun Mountains, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 88(8): 1475~1484.
- Chen Xuanhua, Gehrels G E, Wang Xiaofeng, Yang Feng and Chen Zhengle. 2003. Granite from North Altyn Tagh, NW China; U-Pb geochronology and tectonic setting. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22(4): 294~298 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengle, Wan Jinglin, Wang Xiaofeng, Chen Xuanhua and Pan Jinhua. 2002. Rapid strike-slip of the Altun Tagh fault at 8 Ma and its geological implications. *Acta Geoscientica Sinica*, 23(4): 295~300 (in Chinese with English abstract).
- Compston W, Williams I S and Kirschvink J L. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian timescale. *J Geol Soc London*, 149(2): 171~184.
- Cui Junwen, Tang Zhemin, Deng Jinfu, Yue Yongjun, Meng Lingshun and Yu Qinfan. 1999. Altun fault system. Beijing: Geological Publishing House, 1~249 (in Chinese with English abstract).
- Cui Lingling, Chen Bailin, Yang Nong, Chen Zhengle and Ding Wenjun. 2010. Geochemistry and genesis of basic-intermediate volcanic rocks from Kaladawan, east Altun Tagh Mountains. *Journal of Geomechanics*, 16(1): 96~107 (in Chinese with English abstract).
- Defand M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662~665.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue and Luo Zhaohua. 1996. Continental root-plume tectonics of China—Key to the continental dynamics. Beijing: Geological Publishing House, 50~120 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yimin and He Shiping. 1995. Research for geology and geochemistry of several ophiolites in the north Qilian Mountains, China. *Acta Petrologica Sinica*, 11(suppl.): 125~146 (in Chinese with English abstract).
- Gehrels G E, Yin A and Wang X F. 2003. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau. *J. Geophys. Res.*, 108 (B9), 2423, doi: 10.1029 / 2002 JB001876.
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng and Wang Jianjun. 1998. Sm-Nd isochron age of ophiolite along northern margin of Altun Tagh Mountains and its tectonic significance. *Chinese Science Bulletin*, 44(5): 456~458.
- Han Fengbin, Chen Bailin, Cui Lingling, Wang Shixin, Chen Zhengle, Jiang Rongbao, Li Li and Qi Wanxiu. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb age of intermediate-acid intrusive rocks in Kaladawan area, eastern Altun Mountains, NW China, and its implication. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2277~2291 (in Chinese with English abstract).
- Hao Jie, Wang Erqi, Liu Xiaohan, Sang Haiqing. 2006. Jinyanshan collisional orogenic belt of the early Paleozoic in the Alun Mountains; evidence from single zircon U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating for the arc magmatite and ophiolitic mélange. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2743~2752 (in Chinese with English abstract).
- Hao Ruixiang, Chen Bailin, Chen Zhengle, Wang Yong, Li Songbin, Han Fengbin and Zhou Yonggui. 2013. Geochemical characteristics of basalts from Kaladawan in east Altun Mountains of Xinjiang and their implication. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(2): 307~317 (in Chinese with English abstract).
- Kay R W. 1978. Alutian magnesian andesites: melts from subduction Pacific ocean crust. *Geothem*, Vol. 1, 4: 11~132.
- Le Maitre R W. 1984. A proposal by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram. *Australian J Earth Sci*, 31: 243~255.
- Li Songbin, Chen Bailin, Chen Zhengle, Hao Ruixiang, Zhou Yonggui and Han Fengbin. 2013. Geochemistry and tectonic implication of the early Paleozoic felsic to intermediate volcanic rocks from Kaladawan area, north Altyn. *Geological Review*, 59(3): 423~436 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Che Zicheng, Wang Yan, Luo Jinhai, Wang Jianqi and Gao Zhangqian. 1998. The evidences of Sm-Nd isochron age for the early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 43(9): 754~756.
- Liu Liang, Che Zicheng, Wang Yan, Luo Jinhai and Chen Danling. 1999. The petrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 57~64 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Neubauer F, Genser J, Ge XH, Takasu A, Yuan SH, Chang LH and Li WM. 2007. Geochronology of the initiation and displacement of the Altyn Strike-Slip Fault, western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(2-3): 243~252.
- Liu Yongshun, Yu Haifeng, Xin Houtian, Lu Songnian, Xiu Qunye and Li Quan. 2009. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Mountains, China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1430~1438 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang and Sang Longkang. 2002. *Petrology*. Beijing: Geological Publishing House, 369~386 (in Chinese without English abstract).
- Ludwig K R. 2001. *Squid 1. 02: A user's manual*: Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2, 15~35.
- Ludwig K R. 2003. *User's manual for Isoplot 3. 00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 40: 1~70.
- Meng Fancong, Zhang Jianxin, Yu Shengyao and Chen Songnian. 2010. The early Paleozoic pillow basalt in northern Altyn, western China and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 981~990 (in Chinese with English abstract).
- Michael P. Gorton, Eva S Schandl. 2000. From continents to island arcs; a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *The Canadian*

- Mineralogist, 38: 1065~1073.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37: 215~224.
- Muller D, Rock N M S, Groves D I. 1992. Geochemical Discrimination Between Shoshonitic and Potassic Volcanic Rocks in Different Tectonic Settings; a Pilot Study. *Mineralogy and Petrology*, 46: 259~289.
- Qi Xuexiang, Li Haobing, Wu Cailai, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Meng Fancong, Shi Rendeng and Chen Songnian. 2005. Zircon SHRIMP dating of granodiorite in the Qiashikansayi area, northern Altun Tagh Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 50 (6): 571~576 (in Chinese without English abstract).
- Qian Qing, Zhang Qi and Sun Xiaomeng. 2001. Tectonic setting and mantle source characteristics of Jiugequan basalts, north Qilian; Constraints from trace elements and Nd-isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (3): 385~394 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiexiang and Lin Jinhqian. 1991. *Petrochemistry*. Beijing: Geological Publishing House, 30~240 (in Chinese without English abstract).
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Wu Cailai and Wooden J. 2004. First SHRIMP Dating for the formation of the late Sinian Yushigou ophiolite, north Qilian Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 78 (5): 649~667 (in Chinese with English abstract).
- Sobel E R and Arnaud N. 1999. A possible middle Paleozoic suture in the Altun Tagh, NW China. *Tectonics*, 18(1): 64~74.
- Song Biao, Zhang Shuanhong, Wang Yanbin and Zhao Yue. 2006. Avoidance of systematic bias of SHRIMP zircon U-Pb dating; Necessity of staged calibrations. *Rock and Mineral Analysis*, 25 (1): 9~14 (in Chinese with English abstract).
- Sun S and Mc Donough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42: 313~345.
- Wang Dezi and Shu Liangshu. 2007. On granitic tectonio-magmatic assemblages. *Geological Journal of China Universities*, 13 (3): 362~370 (in Chinese with English abstract).
- Williams I S, Buick S, Cartwright I. 1996. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia. *J Metamorph Geol*, 14(1): 29~47.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Rev Econ Geol*, 7: 1~35.
- Wu Cailai, Xu Xueyi, Gao Qianming, Li Xiangmin, Lei Min, Gao Yuanhong, Frost R B and Wooden J L. 2010. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in north Qilian, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1027~1044 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Yao Shangzhi, Zeng Lingsen, Chen Songnian, Li Haobing, Wooden J L & Mazadab F K. 2005. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at south margin of the Bashikaogong basin, north Altun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (3): 846~858 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yao Shangzhi, Zeng Lingsen, Yang Jingsui, Wooden J L, Chen Songnian and Mazadab F K. 2007. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong-Simi'erbulake, north Altun, NW China. *Science in China (Serial D)*, 37(1): 10~26 (in Chinese without English abstract).
- Wu Jun, Lan Chaoli, Li Jiliang and Yu Liangjun. 2002. Geological evidence of MORB and OIB combination in Hongliugou ophiolitemélanges, Altun fault belt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21 (1): 24~30 (in Chinese without English abstract).
- Xiu Qunye, Yu Haifeng, Liu Yongshun, Lu Songnian, Mao Debao, Li Huimin and Li Quan. 2007. Geology and Zircon U-Pb age of pillow basalts at Qiashikansayi in northern Altun Tagh, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 787~794 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Jiang Mei, Li Haobing and Cui Junwen. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73 (3): 193~205 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailian, Su Dechen, Chen Songnian, Wang Xibin and Wooden J. 2008. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan, north Altun, at the northern margin of the Tibetam. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1567~1584 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yi, Chen Xuanhua, Gehrels GE, Wang Xiaofeng, Qin Hong, Chen Zhengle, Yang Feng, Chen Bailin and Li Xuezhi. 2004. Early Paleozoic Magmatism and Gold Metallogenesis in Altun Mountains, Northwest China. *Mineral Deposits*, 23(4): 464~472 (in Chinese with English abstract).
- Yin A, Rumelhart P E, Butler R, Cowgill E, Harrison T M, Foster D A, Ingersoll R V, Zhang Q, Zhou X-Q, Wang X-F, Hanson A and Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 114 (10): 1257~1295.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao, Chen Wen and Chen Songnian. 2007. ^{39}Ar - ^{40}Ar geochronology of high-pressure/low-temperature blueschist and eclogite in the North Altyn Tagh and their tectonic implications. *Geology in China*, 34 (4): 558~564 (in Chinese without English abstract).
- Zhang Qi, Sun Xiaomeng, Zhou Dejin, Qian Qing, Chen Yu, Wang Yueming, Jia Xiuqin and Han Song. 1997. The characteristics of north Qilian ophiolites, environment of formation and their tectonic significance. *Advance in Earth Sciences*, 12(4): 366~393 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan and Qian Qing. 2000. The north Qilian oceanic basin of the early Paleozoic age an aulacongen or a barge oceanic basin: A discussion with Ge Xiaohong. *Scientia Geologica Sinica*, 35 (1): 121~128 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhanwu, Huang Gang, Li Huaimin and Zhang Wenfeng. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and geochemistry of gabbro and diorite from Qilesayi pluton in Lapeiquan area of northern Altun mountains and their tectonic implication. *Acta*

- Petrologica et Mineralogica, 31(1):13~27 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhicheng, Guo Zhaojie and Song Biao. 2009. SHRIMP zircon dating of gabbro from themélangé in the northern Altyn Tagh and its geological implication. *Acta Petrologica sinica*, 25(03): 568~576 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Wang Qiang and Xiong Xiaolin. 2004. Complex Mantle—Crust interaction in subduction zone. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(4):277~284 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Liu Yike and Zhang Chong. 2002. Tectono-stratigraphic characteristics of continent crustal remnant in central - western sector of the north Qilian orogen. *Chinese Journal of Geology*, 37(3): 302~312 (in Chinese with English abstract).
- ### 参 考 文 献
- 车自成, 刘良, 罗金海. 2002. 中国及其邻区区域大地构造学. 北京: 科学出版社, 207~369.
- 陈柏林, 崔玲玲, 白彦飞, 王世新, 陈正乐, 李学智, 祁万修, 刘荣. 2010. 阿尔金山断裂走滑位移的新认识——来自阿尔金山东段地质找矿进展的启示. *岩石学报*, 26(11): 3387~3396.
- 陈柏林, 蒋荣宝, 李丽, 陈正乐, 祁万修, 刘荣, 崔玲玲, 王世新. 2009. 阿尔金山东段喀腊大湾地区铁矿带的发现及其意义. *地球学报*, 30(2):143~154.
- 陈柏林, 赵恒乐, 马玉周, 杨风, 王世新, 陈正乐, 祁万修, 刘荣, 蒋荣宝, 李丽. 2012. 阿尔金山阿北银铅矿控矿构造特征与矿床成因初探. *矿床地质*, 31(1):13~26.
- 陈柏林, 崔玲玲, 陈正乐. 2014. 阿尔金山喀腊大湾地区变形岩石 EBSD 组构分析. *地质学报*, 88(8):1475~1484.
- 陈宣华, Gehrels G E, 王小凤, 杨风, 陈正乐. 2003. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨. *矿物岩石地球化学通报*, 22(4): 294~298.
- 陈正乐, 万景林, 王小凤, 陈宣华, 潘锦华. 2002. 阿尔金山断裂 8Ma 左右的快速走滑及其地质意义. *地球学报*, 23(4): 295~300.
- 崔军文, 唐哲民, 邓晋福, 岳永君, 孟令顺, 余钦范. 1999. 阿尔金山断裂系. 北京: 地质出版社, 1~249.
- 崔玲玲, 陈柏林, 杨农, 陈正乐, 丁文君. 2010. 阿尔金山东段中基性火山岩岩石地球化学特征及成因探讨. *地质力学学报*, 16(1): 96~107.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 罗照华. 1996. 大陆根柱构造: 大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 50~120.
- 冯益民, 何世平. 1995. 北祁连蛇绿岩的地质地球化学研究. *岩石学报*, 11(增刊):125~146.
- 韩凤彬, 陈柏林, 崔玲玲, 王世新, 陈正乐, 蒋荣宝, 李丽, 祁万修. 2012. 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性侵入岩 SHRIMP 年龄及其意义. *岩石学报*, 28(7): 2277~2291.
- 郝杰, 王二七, 刘小汉, 桑海涛. 2006. 阿尔金山脉中金雁山早古生代碰撞造山带: 弧岩浆岩的确定与岩体锆石 U-Pb 和蛇绿混杂岩年代学研究的证据⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学研究的证据. *岩石学报*, 22(11):2743~2752.
- 郝瑞祥, 陈柏林, 陈正乐, 王永, 李松彬, 韩凤彬, 周永贵. 2013. 新疆阿尔金山喀腊大湾地区玄武岩的地球化学特征及地质意义. *地球学报*, 34(2):307~317.
- 李松彬, 陈柏林, 陈正乐, 郝瑞祥, 周永贵, 韩凤彬. 2013. 阿尔金山北缘喀腊大湾地区早古生代中酸性火山熔岩岩石地球化学特征及其构造环境. *地质评论*, 59(3):423~436.
- 刘良, 车自成, 王焰, 罗金海, 陈丹玲. 1999. 阿尔金山高压变质带的特征及其构造意义. *岩石学报*, 15(1): 57~64.
- 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 陆松年, 修群业, 李铨. 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件. *地质通报*, 28(10): 1430~1438.
- 路风香, 桑隆康. 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社, 369~386.
- 孟繁聪, 张建新, 于胜尧, 陈松永. 2010. 北阿尔金山红柳泉早古生代枕状玄武岩及其大地构造意义. *地质学报*, 84(7):981~990.
- 戚学祥, 李海兵, 吴才来, 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 史仁灯, 陈松年. 2005. 北阿尔金山什坎萨依花岗岩岗长岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年及其地质意义. *科学通报*, 50(6):571~576.
- 钱青, 张旗, 孙晓猛. 2001. 北祁连九个泉玄武岩的形成环境及地幔源区特征: 微量元素 Nd 同位素地球化学制约. *岩石学报*, 17(3):385~394.
- 青海省地质矿产局. 1980. 1/20 万鹅博梁幅区域地质调查报告.
- 邱家骧, 林景仟. 1991. 岩石化学. 北京: 地质出版社, 30~240.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, Wooden J. 2004. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据. *地质学报*, 78(5): 649~667.
- 宋彪, 张栓宏, 王彦斌, 赵越. 2006. 锆石 SHRIMP 年龄测定数据处理时系统偏差的避免. *矿岩测试*, 25(1):9~14.
- 王德滋, 舒良树. 2007. 花岗岩构造岩浆组合. *高校地质学报*, 13(3):362~370.
- 吴才来, 徐学义, 高前明, 李向民, 雷敏, 郜源红, Frost R B, Wooden J L. 2010. 北祁连早古生代花岗岩岩浆作用及构造演化. *岩石学报*, 26(4): 1027~1044.
- 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 曾令森, 陈松年, 李海兵, 戚学祥, Wooden J L, Mazadab F K. 2005. 北阿尔金山巴什考供盆地南缘花岗岩杂岩特征及锆石 SHRIMP 定年. *岩石学报*, 21(3):846~858.
- 吴才来, 姚尚志, 曾令森, 杨经绥, Wooden J L, 陈松永, Mazadab F K. 2007. 北阿尔金山巴什考供—斯米尔布拉克花岗岩杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *中国科学(D辑)*, 37(1):10~26.
- 吴峻, 兰朝利, 李继亮, 俞良军. 2002. 阿尔金山红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 与 OIB 组合的地球化学证据. *岩石矿物学杂志*, 21(1): 24~30.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1981. 1/20 万索尔库里幅和巴什考供幅区域地质调查报告.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区地质志. 北京: 地质出版社, 1~941.
- 修群业, 于海峰, 刘永顺, 陆松年, 毛德宝, 李惠民, 李铨. 2007. 阿尔金山北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄. *地质学报*, 81(6):787~794.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金山断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. *地质学报*, 73(3): 193~205.
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 苏德辰, 陈松永, 王希斌, WOODEN Joseph. 2008. 北阿尔金山地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年. *岩石学报*, 24(7):1567~1584.
- 杨屹, 陈宣华, George Gehrels, 王小凤, 秦红, 陈正乐, 杨风, 陈柏林, 李学智. 2004. 阿尔金山早古生代岩浆活动与金成矿作用. *矿床地质*, 23(4): 464~472.

张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 陈文, 陈松永. 2007. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域构造意义. 中国地质, 34(4): 558~564.

张旗, 孙晓猛, 周德进, 钱青, 陈雨, 王岳明, 贾秀琴, 韩松. 1997. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义. 地球科学进展, 12(4): 366~393.

张旗, 王焰, 钱青. 2000. 北祁连早古生代洋盆是裂陷槽还是大洋盆. 地质科学, 35(1): 121~128.

张占武, 黄岗, 李怀民, 张文峰. 2012. 北阿尔金拉配泉地区齐勒萨

依岩体的年代学、地球化学特征及其构造意义. 岩石矿物学杂志, 31(1): 13~27.

张志诚, 郭召杰, 宋彪. 2009. 阿尔金山北缘蛇绿混杂岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 25(03): 568~576.

赵振华, 王强, 熊小林. 2004. 俯冲带复杂的壳幔相互作用. 矿物岩石地球化学通报, 23(4): 277~284.

左国朝, 刘义科, 张崇. 2002. 北祁连造山带中—西段陆壳残块群的构造—地层特征. 地质科学, 37(3): 302~312.

Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Intermediate-Felsic Volcanic Rocks from the Kaladawan Area, Altun Mountains and Its Tectonic Environment

CHEN Bolin¹⁾, LI Songbin¹⁾, JIANG Rongbao¹⁾, CHEN Zhengle¹⁾, HAN Fengbin¹⁾,
CUI Lingling¹⁾, LI Li¹⁾, ZHAO Shuming²⁾, QI Wanxiu²⁾, YANG Yi²⁾,
WANG Shixin²⁾, WANG Yong¹⁾, ZHOU Yonggui¹⁾, HAO Ruixiang¹⁾

1) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;*

2) *Institute of Xinjiang Geological Survey Research, Urumqi, 830011*

Abstract

The Kaladawan area of Altun Mountains is located in the central segment of the Hongliugou-Lapeiquan structural belt, which is bounded by the NE-striking Altun strike-slip faults to the north and the E-W-trending northern Altun fault. The area is widely developed with volcanic-sedimentary rocks, which were determined to be Mesoproterozoic in age by previous studies. In this study zircon SHRIMP U-Pb dating for the intermediate-felsic volcanic rocks from the volcanic-sedimentary rocks was conducted and yielded an age of 477~485 Ma, which confirms the existence of intermediate and felsic magmatic activity in the Kaladawan area during early Paleozoic. Petrogeochemical study also indicates that the volcanic rocks reflect the tectonic setting of active continental margin (Island arc) and magma source is characteristic of I-type and I-S transition type. In combination with dating and tectonic setting tracing of the ophiolitic mélangé, high pressure metamorphic mudstone, eclogite, intermediate-felsic intrusive rocks in the Hongliugou-Lapeiquan structural belt, the authors suggest that the intermediate-felsic volcanic rocks in the Kaladawan area are related to a tectonic setting of active continental margin (Island arc) and the age is roughly consistent with the final phase of ophiolitic mélangé, representing that the syn-collision intermediate-felsic volcanic rocks resulting from the subduction of oceanic crust process. The Hongliugou-Lapeiquan structural belt can be divided into 3 evolutionary stages: ① a period of oceanic crust expansion in the Late Proterozoic-Cambrian (the age of ophiolitic mélangé is 510~580Ma and the expansion was slightly earlier); ② a period of subduction-collision of oceanic crust plates in Early Ordovician-Middle Ordovician early (the age of intermediate-acidic volcanic rocks (including intrusive rock and volcanic rock) is 477~488Ma, part of granite has an age of 467Ma and high pressure metamorphic rocks of regressive metamorphism age is 479~491Ma); ③ a period of post-collision to extension in Late Ordovician-Silurian (the ophiolitic mélangé metamorphic basement is 450~455Ma in age, which represent final emplacement of ophiolitic mélangé, and collision and post-collision S-type granite has the age of 417~431Ma, which shows the post-collision to extension settings).

Key words: intermediate-felsic volcanic rocks; SHRIMP dating; tectonic setting and evolution; Kaladawan area; Altun Mountains