

东昆仑造山带晚三叠世岩浆混合作用:以和勒冈希里克特花岗闪长岩体为例

陈国超^{1,4} 裴先治¹ 李瑞保¹ 李佐臣¹
裴 磊² 刘战庆³ 陈有炘¹ 刘成军¹

(1.西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,长安大学地球科学与资源学院,陕西 西安 710054;2.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083;3.桂林理工大学地球科学学院,广西 桂林 541004;4.陕西省煤田地质局勘察研究院,陕西 西安 710054)

摘要:东昆仑造山带晚华力西期—印支期花岗质岩石中广泛发育暗色微粒包体。本文以东昆仑东段和勒冈希里克特花岗闪长岩体为例,对暗色微粒包体及其寄主岩进行了详细研究。包体的野外产出特征、形态、结构构造和矿物学特征表明,他们是基性岩浆进入中酸性岩浆快速冷凝结晶的产物,和寄主花岗岩有着相似的稀土元素配分模式,显示轻稀土富集,重稀土亏损,轻重稀土元素分馏明显的特征,微量元素蛛网图也具有明显的相似性,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,反映了岩浆混合作用的特征;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学研究表明,暗色微粒包体的形成年龄为(224.9±4.1)Ma,与寄主岩的同位素年龄值(225±5)Ma 在误差范围内一致,表明了晚三叠世期间东昆仑地区存在着后碰撞阶段壳-幔岩浆混合作用。

关键词:东昆仑造山带;和勒冈希里克特岩体;花岗闪长岩;暗色微粒包体;岩浆混合作用;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄;晚三叠世

中图分类号:P588.11⁺5;P597⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)04-1044-22

花岗岩类是组成大陆地壳的主要岩石,花岗岩成因研究属于地球科学中的前沿问题。花岗质岩石中暗色微粒包体代表了幔源岩浆参与花岗质岩石的形成,是壳-幔相互作用的重要证据之一,岩浆混合作用及其产物还涉及岩浆热动力学和地球动力学等,对包体进行深入研究可以揭示花岗质岩浆的起源、演化机理和深部岩浆作用过程等重大基础地质问题^[1-13]。

近年来花岗质岩浆混合作用成为火成岩研究中的热点,认为基性岩浆与酸性岩浆的混合是导致花岗质岩石在成分上多样性的主要原因之一^[14-17]。不

同学者对于花岗质岩石中暗色微粒包体的分类有着不同的认识。Didier^[18]等把其分为三类:捕虏体、残留体、镁铁质暗色微粒包体。暗色微粒包体的成因较为复杂,主要有以下 3 种观点:(1)源区岩石经部分熔融后形成的难熔物质残留体^[19];(2)岩浆侵位过程中捕获的围岩捕虏体或岩浆作用过程中暗色矿物相对集中形成的析离体^[18];(3)是注入花岗质岩浆中的基性岩浆团,即岩浆混合作用的产物^[20-22]。

东昆仑造山带晚华力西期—印支期花岗质岩石中广泛发育暗色微粒包体,前人对其做过较详细的研究;姜春发等^[23-29]通过对东昆仑岩浆活动的研究,

收稿日期:2012-11-02;改回日期:2013-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41172186、40972136、40572121)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011TD020)和青海省国土资源厅-中国铝业公司公益性区域地质矿产调查基金项目(中铝基金 200801)及中央高校基本科研业务费专项基金项目(2013G1271091)共同资助。

作者简介:陈国超,男,1979 年生,博士生,构造地质学专业,主要从事造山带岩浆作用研究;E-mail:chaoschen@126.com。

通讯作者:裴先治,男,1963 年生,教授;E-mail:peixzh@sina.com。

划分了东昆仑华力西期—印支期花岗质岩浆活动系列和成对空间分带性指示的构造岩浆移动方向。郭正府等^[2]在总结前人研究成果的基础上初步建立起印支期花岗岩年代学格架,把东昆仑晚华力西期—早燕山期构造演化分为洋脊形成与扩张阶段、大洋板块大规模俯冲阶段和陆内造山阶段。袁万明等^[26-27]通过对东昆仑印支期花岗岩时空分布的研究,详细论述了早、中、晚三叠世东昆仑地区花岗岩的构造背景和分布特征。最近研究结果表明^[28-33],东昆仑地区在晚三叠世—中三叠世存在着由于板片断离导致的幔源岩浆底侵作用。但是对晚三叠世花岗质岩石中暗色微粒包体的报道较少,对其成因机制也缺少详细的研究。因此本文在野外地质调查的基础上,通过对东昆仑东段南缘地区和勒冈希里克特花岗闪长岩体中暗色微粒包体的岩相学、锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学的研究,初步讨论了东昆仑地区晚三叠世岩浆混合作用过程及其地球动力学机制。

1 区域地质概况

东昆仑造山带位于青藏高原北部,柴达木地块南缘,自北向南被东昆北、东昆中、东昆南3条断裂带分为:东昆北构造带、东昆中蛇绿混杂岩带、东昆南构造带和阿尼玛卿—布青山构造混杂岩带等4个构造单元,研究区位于东昆南构造带。东昆仑造山带经历了加里东期和晚华力西期—印支期两次板块汇聚,岩石、地层组成和构造十分复杂。研究区所在构造单元以发育大量前寒武纪基底变质岩系为特征,包括古元古界白沙河岩组、中元古界长城系小庙岩组和蓟县系狼牙山组、下古生界纳赤台岩群。白沙河岩组主体以钙硅酸粒岩、斜长角闪片岩及不同类型的大理岩为主,局部夹有黑云斜长片麻岩、含石榴石黑云斜长片麻岩、黑云母变粒岩、云母石英片岩及石英岩、长石石英岩;小庙岩组为一套石英岩、二云斜长片麻岩、长英质片麻岩,其变质程度达到低角闪岩相;狼牙山组主要岩石组合为灰—深灰色中薄层—中厚层状白云质灰岩;纳赤台岩群变质较深达低角闪岩相,主要岩石类型为石英片岩、二云片岩和变质基性火山岩。三叠纪地层发育较全,包括下三叠统洪水川组、中三叠统(安尼阶)闹仓坚沟组、中三叠统(拉丁阶)希里克特组和上三叠统八宝山组。洪水川组为碎屑岩与碳酸盐岩沉积组合,闹仓坚沟组下部主体为碎屑岩为主夹碳酸盐岩沉积组合;上部总体为碳

酸盐岩为主夹碎屑岩沉积组合;希里克特组为一套碎屑岩沉积,与下伏闹仓坚沟组呈微角度不整合接触关系;八宝山组为一套陆相碎屑岩组合,与下伏闹仓坚沟组呈角度不整合接触关系(图1)。研究区内出露侵入前寒武纪变质地层的白沙河岩组和小庙岩组的加里东期钾长花岗岩和石英闪长岩,石英闪长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 (515.2 ± 4.4) Ma^[34],在研究区南部零星出露有晚三叠世花岗质岩石,侵位于中三叠统闹仓坚沟组沉积地层中。

2 岩体地质及岩相学特征

和勒冈希里克特花岗闪长岩体出露于东昆仑造山带南缘洪水川北侧的和勒冈希里克特—伊和哈让贵地区(图2)。岩体呈不规则形状,面积约 8.3 km²,近 EW 向展布。主要岩性为浅灰—浅肉红色中细粒黑云母花岗闪长岩,侵位于中三叠统闹仓坚沟组细碎屑岩段。和勒冈希里克特花岗岩体中发育大量大小不一、形态各异的暗色微粒包体,呈浑圆状、椭圆状、倒水滴状、长条状等不规则形状(图3-A),长轴一般在 10 cm×20 cm,偶见 30 cm。在暗色微粒包体中有时可以见到大的斜长石晶体和细小反向脉,斜长石晶体的边部可以见到一些熔蚀现象,反向脉成分为花岗质,细粒结构为主。一些暗色微粒包体与寄主岩的界线整体比较清晰,边部颗粒较中间细小,有的界线较模糊呈渐变过渡关系;不同暗色微粒包体的矿物粒度有差别。

寄主岩岩性为浅灰色—浅肉红色中细粒花岗闪长岩,岩石呈中细粒花岗结构,块状构造,组成矿物为斜长石(55%~60%)、石英(22%±)、钾长石(15%±)、黑云母(3%±)、角闪石(2%±);副矿物为磷灰石、榍石、锆石。斜长石呈柱状、板柱状,颗粒平均粒径 0.5~2 mm,部分 2~3 mm,斜长石表面由于蚀变显得较浑浊,但聚片双晶常见,双晶纹较稀疏,有时可见斜长石韵律环带结构(图3-B),钾长石呈半自形粒状。石英有两种情况,一种呈他形粒状分布于斜长石间隙,另一种呈细小粒状分布于斜长石、角闪石和石英的边部(图3-C)。黑云母多成棕褐色—褐绿色,呈鳞片状,有时见其中包裹较自形斜长石晶体,常可见边缘被熔蚀成锯齿状(图3-D),偶见黑云母中间部分熔蚀,形成浑圆状、乳滴状新矿物,为交代穿孔结构(图3-E),最常见的穿孔矿物为石英和长石。角闪石与黑云母零散分布于岩石中,角闪石呈柱状及

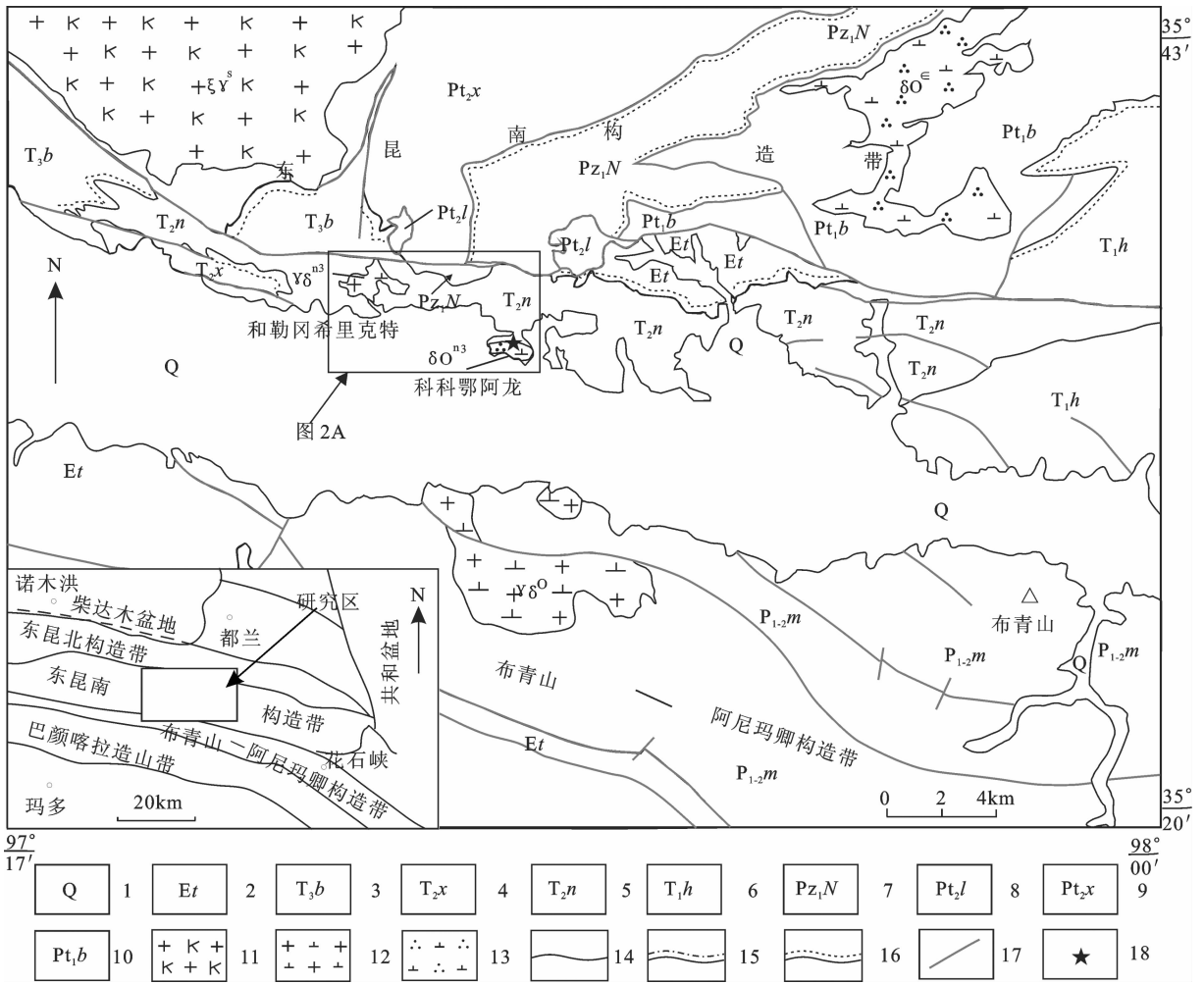


图1 东昆仑造山带东段及其南侧邻区地质简图

1—第四系;2—古近系沱沱河组;3—上三叠统八宝山组;4—中三叠统希里可特组;5—中三叠统闹仓坚沟组;6—下三叠统洪水川组;7—下古生界纳赤台岩群;8—中元古界蓟县系狼牙山组;9—中元古界长城系小庙岩组;10—古元古界白沙河岩组;11—钾长花岗岩;12—花岗闪长岩;13—石英闪长岩;14—地质界线;15—平行不整合界线;16—角度不整合界线;17—断层;18—同位素年龄采样点

Fig.1 Geological sketch map of eastern EKOB and southern adjacent areas

1—Quaternary; 2—Paleogene Tuotuohe Formation; 3—Upper Triassic Babaoshan Formation; 4—Middle Triassic Xilikete Formation; 5—Middle Triassic Naocangiangou Formation; 6—Lower Triassic Hongshuichuan Formation; 7—Lower Paleozoic Nachitai Rock Group; 8—Langyashan Formation of Meso-Proterozoic Jixian System; 9—Xiaomiao Rock Formation of Meso-Proterozoic Changcheng System; 10—Paleo-Proterozoic Baishahe Rock Formation; 11—Moyite; 12—Granodiorite; 13—Quartz diorite; 14—Geological boundary; 15—Parallel unconformity; 16—Angular unconformity; 17—Fault; 18—Isotopic age sampling position

粒状,在一些角闪石中可以见到增生边(图3-F)。岩石蚀变主要为斜长石和钾长石的绢云母化与高岭土化,黑云母和角闪石的绿泥石化。

暗色微粒包体为闪长质,呈斑状结构,团块状、透镜状、水滴状或港湾状构造。主要组成矿物与寄主岩相似,为斜长石(65%±)、角闪石(35%±)、黑云母(2%±),相对于寄主岩,其暗色矿物含量较高,石英和钾长石含量较低。暗色微粒包体中“斑晶”含量约15%,主要为斜长石及角闪石,以斜长石为主,粒径

平均0.5~2.4 mm,呈板状和板柱状。斜长石斑晶聚片双晶发育,具震荡环带结构,边部常见增生边,多包裹角闪石、黑云母、石英和楣石等矿物,形成包含镶嵌结构,这些包裹体往往呈针状或长条状,矿物颗粒相对细小。基质中成分主要为斜长石和角闪石,斜长石颗粒平均0.2~0.3 mm,自形的斜长石条晶构成三角形架构,在其间隙中分布粒状角闪石(图3-G)。石英呈他形粒状分布于斜长石间隙之中,有时石英呈团块状较集中分布,粗大的石英颗粒中常包

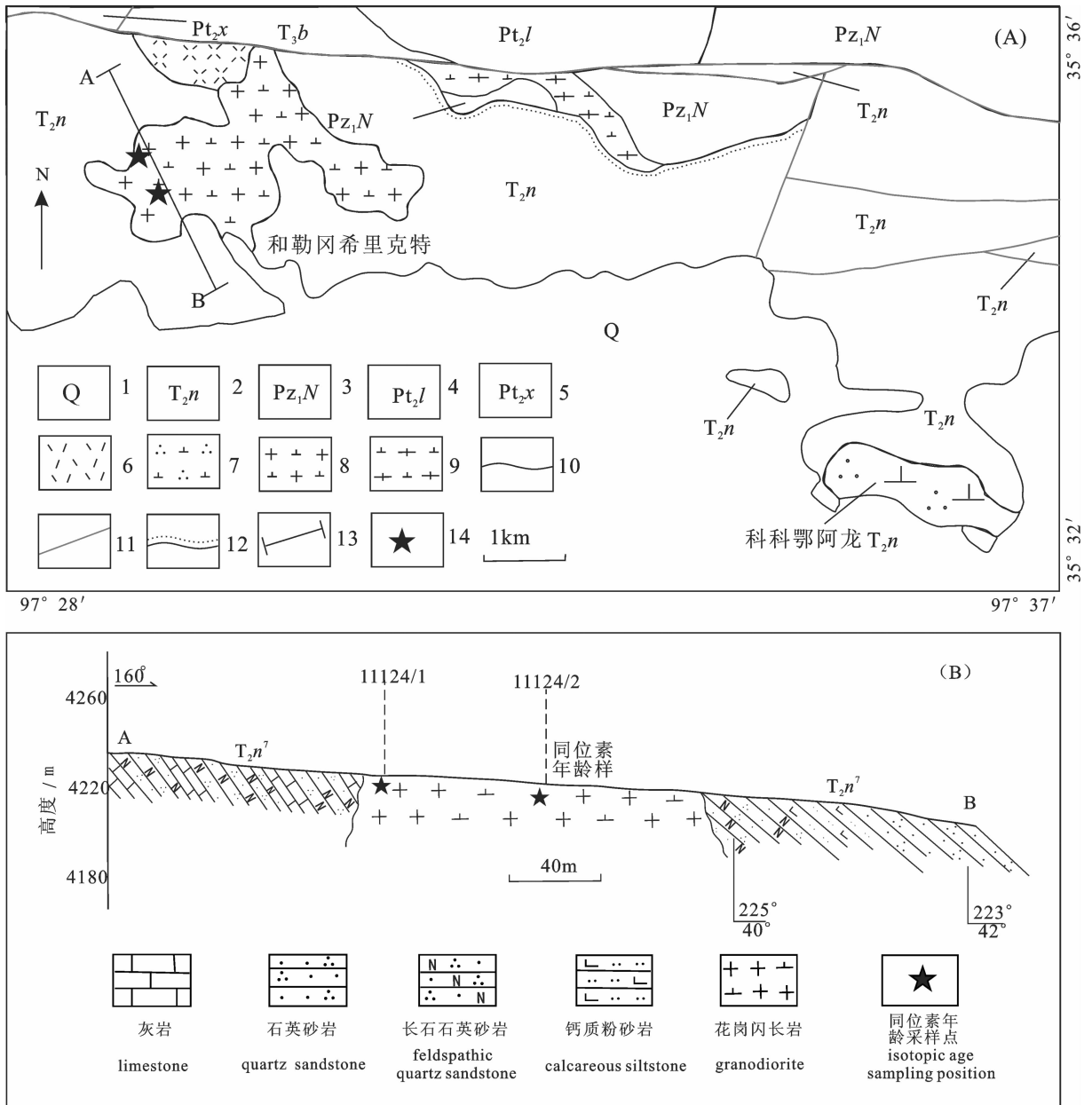


图 2 东昆仑东段洪水川地区花岗岩体平面地质图(A)及东昆仑东段洪水川地区和勒冈希里克特花岗岩体实测剖面图(B)

1—第四系;2—中三叠统纳仓坚沟组;3—下古生界纳台岩群;4—中元古界狼牙山组;5—中元古界小庙岩组;6—流纹岩;7—石英闪长岩;8—花岗岩闪长岩;9—花岗岩闪长质片麻岩;10—地质界线;11—断层;12—不整合界线;13—实测剖面;14—同位素年龄采样点;

Fig.2 Planimetric geological map of Hongshuichuan area in eastern EKOB(A) and geological cross section of Helegang Xilikete plutons(B)

1—Quaternary; 2—Middle Triassic Naocangjiangou Formation; 3—Lower Paleozoic Nachitai Rock Group; 4—Meso-Proterozoic Langyashan Formation; 5—Meso-Proterozoic Xiaomiao Rock Formation; 6—Rhyolite; 7—Quartz diorite; 8—Granodiorite; 9—Granodioritic gneiss; 10—Geological boundary; 11—Fault; 12—Unconformity; 13—Measured geological section; 14—Isotopic age sampling position;

裹较自形的斜长石及黑云母晶体, 偶见石英被一圈细小的暗色硅酸盐矿物所包围(图 3-H)。黑云母呈鳞片状零散分布于基质中, 角闪石和黑云母大部分已绿泥石化, 残留甚少, 角闪石与黑云母零散分布,

残留角闪石和黑云母具有锯齿状边缘。暗色微粒包体中针状磷灰石十分发育, 其晶体长宽比一般在 10~20 之间, 主要存在于基质的长石、石英和黑云母中, 而在斜长石斑晶中几乎见不到(图 3-I)。除暗色

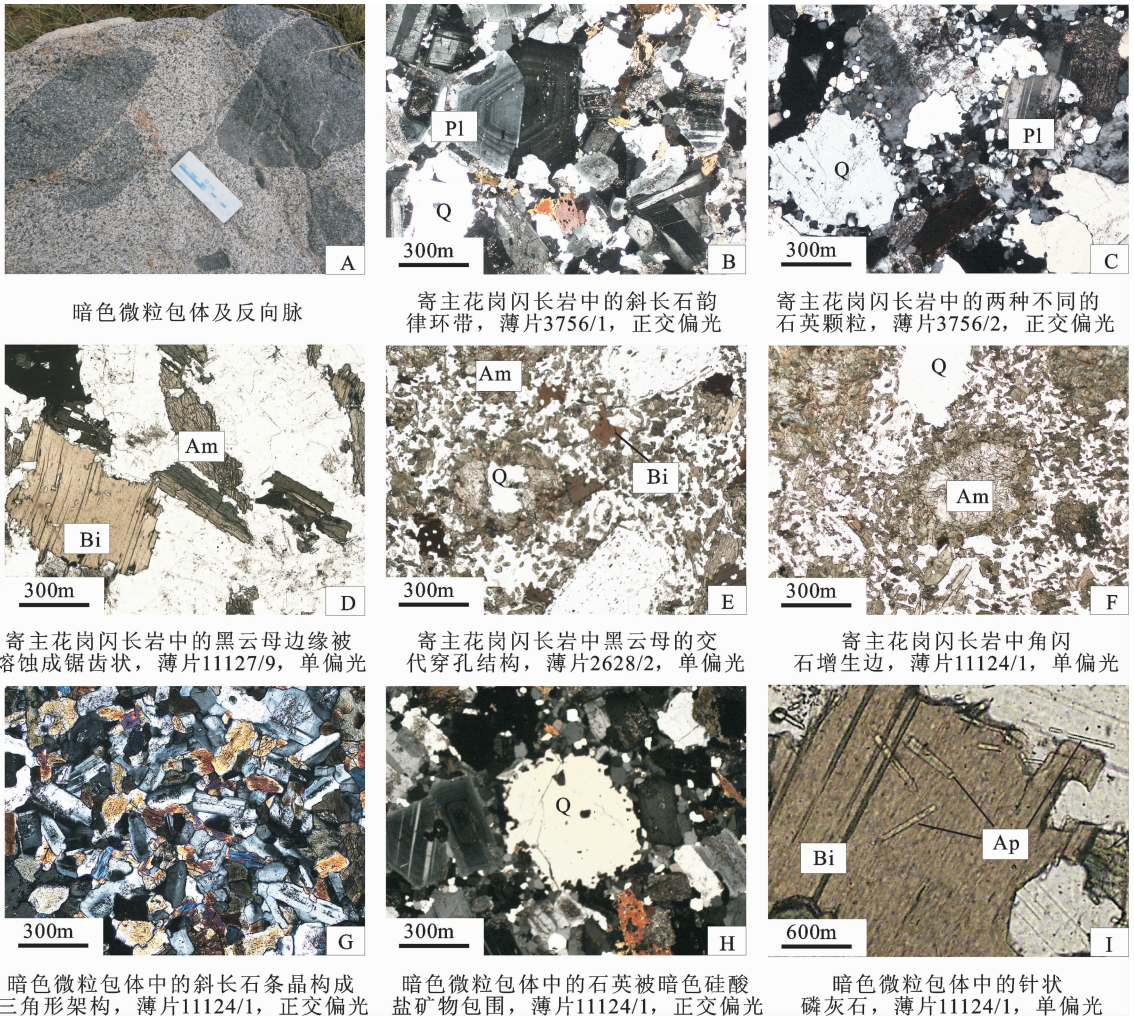


图3 和勒冈希里克特花岗闪长岩及其中暗色微粒包体的野外和镜下照片

Q—石英;Pl—斜长石;Am—角闪石;Bi—黑云母;Ap—磷灰石

Fig.3 Field and microscope photographs of Helegang Xilikete granodiorites and their MEE

Q—Quartz;Pl—Plagioclase;Am—Amphibolite;Bi—Biotite;Ap—Apatite

矿物的绿泥石化蚀变外,岩石整体蚀变较弱。

3 样品采集与分析

3.1 样品采集

样品采集于东昆仑造山带东段南缘的洪水川地区和勒冈希里克特实测剖面(图2)和野外地质调查路线中,分析样品为中细粒花岗闪长岩和闪长质包体,样品新鲜无蚀变。共采集锆石 U—Pb 定年样品 2 件,样品编号为 11124/1、11124/2;岩石地球化学样品 5 件,样品编号为 2616/1、3755/1、3756/1、11124/1、11124/2,同位素年龄采样点地理坐标为:北纬 35°35.281',东经 97°29.524'。

3.2 锆石 U—Pb 定年

用于锆石测年研究的样品先采用常规方法粉碎至 80~100 目,并用常规浮选和电磁选方法进行分选,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。将锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对其表面进行抛光至锆石内部暴露,然后进行反射光和透射光照相。锆石的反射光和透射光显微照相及阴极发光(CL)显微照相在北京离子探针中心扫描电镜实验室的 HITACHI S3000-N 电子探针仪器上完成,分析电压为 15 kV,电流为 19 nA。测试点的选取首先根据锆石反射光和透射光显微照片进行

初选,再与 CL 图像反复对比,力求避开内部裂隙和包体以及不同成因的区域,以期获得较准确的年龄信息。

锆石 U-Pb 同位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上完成。分析仪器为配备有193nm Rf-excimer 激光器的 Geo-Las200M 型(Microlas Gottingen Germany)激光剥蚀系统和 Elan6100DRC 型四极杆质谱仪。分析采用激光剥蚀孔径 30 μm ,剥蚀深度 20~40 μm ,激光脉冲为 10 Hz,能量为 32~36 mJ。测试中用人工合成的硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化。锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标校正,每测定 5 个分析点后插入一次标样测定,以确保标样和样品的仪器条件完全一致。在所测锆石样品分析前后各测一次 NIST610,同时以 ^{29}Si 作为内标测定锆石的 U、Th、Pb 含量。用锆石 91500 进行外标校正同位素组成。LA-ICP-MS 分析的详细方法和流程见袁洪林等^[35]。

样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER (ver4.0, Macquarie University) 程序,并用 Andersen 软件对测试数据进行普通铅校正,年龄计算及谐和图绘制采用 ISOPLOT (2.49 版) 软件完成。所有数据点年龄值的误差均为 1σ ,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值具 95% 的置信度^[36-37]。

4 锆石 U-Pb 年代学

4.1 寄主岩锆石 U-Pb 年代学

和勒冈希里克特花岗闪长岩的锆石 CL 图像中(样品号 11124/2),大部分锆石较自形,且为浅黄色—无色透明短柱状,半截锥状、长柱状、近浑圆状(图 4-A),具有明显的震荡环带和扇形环带,粒径多介于 100~230 μm ,Th/U 比值为 0.56~1.13 之间(表 1),指示他们为岩浆成因锆石^[38-40]。从锆石稀土元素球粒陨石标准化配分图上可以看出(图 4-E),锆石轻、重稀土元素分馏明显,具 Ce 的正异常和 Eu 的负异常($\delta\text{Eu}=0.07\sim 0.71$,表 2),整体为左倾斜模式的轻稀土亏损型。从锆石的 Th/U 比值、形态特征以及微量元素和稀土元素含量来看,锆石为典型的岩浆成因。

本研究用 30 μm 的激光剥蚀斑径分别对样品锆石进行了 LA-ICP-MS 定年分析,共测试了 18

个点。锆石年龄可以明显的分为 2 组:第一组年龄有 2 个测点,分别为 11124/2-08 和 11124/2-17,测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 (413 \pm 7)Ma、(417 \pm 7)Ma,暗示了本区存在着加里东期—构造岩浆事件,从锆石的外形特征分析应为继承锆石或捕获锆石。第二组年龄有 16 个测点,测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和性较好(图 4-C),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (229 \pm 4)Ma~(221 \pm 4)Ma(表 1), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (225 \pm 5)Ma(MSWD=0.049)。因此,本文将和勒冈希里克特花岗闪长岩的形成时代确定为 (225 \pm 5)Ma,为晚三叠世早期。

4.2 暗色微粒包体锆石 U-Pb 年代学

和勒冈希里克特花岗闪长岩体暗色微粒包体锆石的 CL 图像中(样品号 11124/1),大部分锆石较自形,且为浅黄色—无色透明长柱状,具有明显的生长震荡环带和扇形环带(图 4-B),长 100~410 μm ,宽 50~100 μm ,长宽比为 2:1~4:1,Th/U 比值在 0.81~1.71(表 1),明显高于寄主岩(大部分在 0.56~0.84),指示他们为岩浆成因锆石^[41]。暗色微粒包体与寄主岩的锆石在物理性质和化学性质上有明显的差别(图 4-A, 4-B),前者长宽比达 2:1~4:1,颜色较深,环带较宽,可能说明其形成温度较高;并且 Th、U 含量高,比值也较大,这表明暗色微粒中的锆石不是从寄主岩浆中捕获的。在球粒陨石标准化稀土元素配分图中(图 4-F),暗色微粒包体表现出 HREE 富集,LREE 亏损的配分模式,以及强烈的 Ce 的负异常和不太明显的 Eu 的负异常($\delta\text{Eu}=0.39\sim 0.94$,表 2),并且 Th/U 比值都大于 0.1(表 1),这些都表明暗色微粒包体的锆石都是岩浆成因的。

本研究用 30 μm 的激光剥蚀斑径分别对样品锆石进行了 LA-ICP-MS 定年分析,共测试了 27 个点,其中有 3 个测点(11124/1-18,11124/1-24,11124/1-27)信号不好,9 个测点年龄不谐和(11124/1-06,11124/1-07,11124/1-11,11124/1-12,11124/1-15,11124/1-17,11124/1-19,11124/1-21,11124/1-26),可能是因为后期的构造运动造成了 Pb 的丢失,不参与年龄计算。剩余 15 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和性较好, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 (224.9 \pm 4.1)Ma~(217 \pm 3)Ma(表 1)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (24.9 \pm 4.1)Ma(MSWD=0.52)。因此,笔者将和勒冈希里克特暗色微粒包体的结晶时代确定为 (224.9 \pm 4.1)Ma,为晚三叠世。

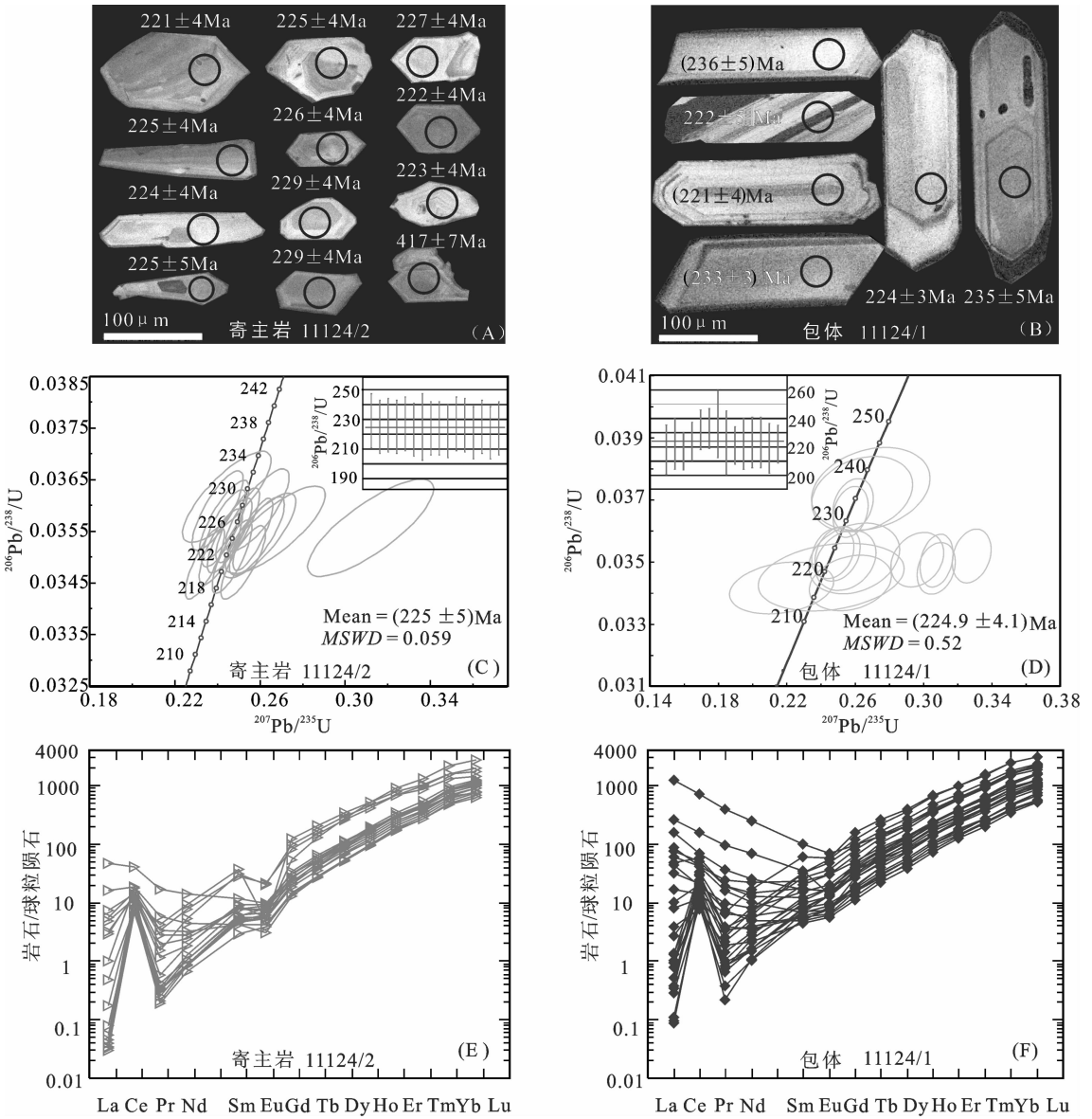


图4 和勒冈希里克特花岗闪长岩(A)和暗色微粒包体(B)代表性单颗粒锆石的阴极发光(CL)图像及其表面年龄;和勒冈希里克特花岗闪长岩(C)和暗色微粒包体(D)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图和直方图;和勒冈希里克特花岗闪长岩(E)和暗色微粒包体(F)的锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图解(球粒陨石标准化数据引自[42])

Fig.4 A, B Cathodoluminescence images of typical single-crystal zircons and their apparent ages (Ma) from Helegang Xilikete granodiorite(11124/2) and their MEE(11124/1);C, D LA-ICP-MS zircon U-Pb concordant age diagram and weighted histogram of Helegang Xilikete granodiorites(11124/2) and their MEE(11124/1);E, F Chondrite-normalized REE patterns of Helegang Xilikete granodiorites(11124/2) and their MEE(11124/1) (chondrite-normalized data after Boynton[42])

5 地球化学特征

5.1 主要元素

和勒冈希里克特寄主岩的 SiO₂ 含量较高 (67.12%~68.46%);碱含量高于暗色微粒包体(K₂O+

Na₂O=6.49%~6.89%), Na₂O/K₂O 相对于暗色微粒包体较低,平均 1.09;岩石的 CaO、FeO^T、MgO 和 TiO₂ 含量较低, Mg[#] 值介于 52~54, 平均为 53。

暗色微粒包体主要元素特征与寄主岩相比差别较大,其 SiO₂ 含量较低(52.01%),富含 Fe、Mg、Ti、

表 1 东昆仑东段和勒冈希里克特岩体中花岗岩 (11124/2) 和暗色微粒包体 (样品 11124/1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope analytical results of Helegang Xilikete granodiorites (sample 11124/2) and their MME (sample 11124/1) of eastern EKOB

| 测试点号 | 元素含量 (10^{-6}) 及比值 | | | | 同位素比值及误差 | | | | 表面年龄/Ma | | | | | |
|------------|------------------------|-------------------|------------------|---------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|
| | ^{206}Pb | ^{232}Th | ^{238}U | Th/U | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1σ |
| 11124/2-01 | 7 | 40 | 48 | 0.84 | 0.04901 | 0.0036 | 0.2444 | 0.0170 | 0.03617 | 0.00072 | 119 | 222 | 148 | 14 |
| 11124/2-02 | 26 | 154 | 192 | 0.81 | 0.04957 | 0.0021 | 0.2430 | 0.0085 | 0.03556 | 0.00061 | 50 | 221 | 175 | 7 |
| 11124/2-03 | 23 | 104 | 157 | 0.66 | 0.04936 | 0.0023 | 0.2431 | 0.0096 | 0.03572 | 0.00063 | 59 | 221 | 165 | 8 |
| 11124/2-04 | 17 | 75 | 117 | 0.63 | 0.05453 | 0.0041 | 0.2671 | 0.0192 | 0.03553 | 0.00069 | 172 | 240 | 393 | 15 |
| 11124/2-05 | 24 | 117 | 168 | 0.70 | 0.04851 | 0.0023 | 0.2401 | 0.0098 | 0.03590 | 0.00063 | 62 | 219 | 124 | 8 |
| 11124/2-06 | 36 | 160 | 247 | 0.65 | 0.04977 | 0.0021 | 0.2416 | 0.0083 | 0.03520 | 0.00060 | 49 | 220 | 184 | 7 |
| 11124/2-07 | 30 | 104 | 166 | 0.63 | 0.06360 | 0.0051 | 0.3120 | 0.0242 | 0.03557 | 0.00077 | 177 | 276 | 728 | 19 |
| 11124/2-08 | 36 | 94 | 150 | 0.62 | 0.05521 | 0.0032 | 0.3040 | 0.0279 | 0.06621 | 0.00119 | 133 | 414 | 421 | 19 |
| 11124/2-09 | 11 | 93 | 83 | 1.13 | 0.05316 | 0.0032 | 0.2597 | 0.0140 | 0.03542 | 0.00067 | 88 | 234 | 336 | 11 |
| 11124/2-10 | 25 | 144 | 177 | 0.81 | 0.05032 | 0.0022 | 0.2458 | 0.0084 | 0.03542 | 0.00059 | 49 | 223 | 210 | 7 |
| 11124/2-11 | 31 | 163 | 223 | 0.73 | 0.05114 | 0.0020 | 0.2469 | 0.0076 | 0.03501 | 0.00058 | 41 | 224 | 247 | 6 |
| 11124/2-12 | 12 | 59 | 78 | 0.75 | 0.05227 | 0.0028 | 0.2588 | 0.0122 | 0.03591 | 0.00065 | 74 | 234 | 297 | 10 |
| 11124/2-13 | 27 | 140 | 189 | 0.74 | 0.05080 | 0.0021 | 0.2494 | 0.0084 | 0.03562 | 0.00059 | 47 | 226 | 232 | 7 |
| 11124/2-14 | 21 | 110 | 146 | 0.76 | 0.05240 | 0.0022 | 0.2521 | 0.0086 | 0.03490 | 0.00058 | 47 | 228 | 303 | 7 |
| 11124/2-15 | 37 | 259 | 254 | 1.02 | 0.05253 | 0.0021 | 0.2567 | 0.0076 | 0.03544 | 0.00057 | 39 | 232 | 309 | 6 |
| 11124/2-16 | 30 | 144 | 217 | 0.67 | 0.04867 | 0.0020 | 0.2341 | 0.0074 | 0.03489 | 0.00057 | 45 | 214 | 132 | 6 |
| 11124/2-17 | 44 | 94 | 168 | 0.56 | 0.05991 | 0.0022 | 0.5515 | 0.0141 | 0.06679 | 0.00108 | 29 | 446 | 600 | 9 |
| 11124/2-18 | 29 | 129 | 188 | 0.68 | 0.05299 | 0.0026 | 0.2586 | 0.0105 | 0.03541 | 0.00062 | 61 | 234 | 328 | 8 |
| 11124/1-01 | 60 | 512 | 392 | 0.77 | 0.05150 | 0.0040 | 0.2641 | 0.0195 | 0.03719 | 0.00080 | 129 | 238 | 263 | 16 |
| 11124/1-02 | 49 | 316 | 335 | 1.06 | 0.05433 | 0.0035 | 0.2571 | 0.0158 | 0.03433 | 0.00059 | 148 | 232 | 385 | 13 |
| 11124/1-03 | 29 | 152 | 183 | 1.21 | 0.06104 | 0.0026 | 0.2964 | 0.0102 | 0.03508 | 0.00058 | 46 | 264 | 641 | 8 |
| 11124/1-04 | 27 | 151 | 149 | 0.99 | 0.04605 | 0.0043 | 0.2169 | 0.0201 | 0.03417 | 0.00055 | 201 | 199 | 0 | 17 |
| 11124/1-05 | 51 | 347 | 322 | 0.93 | 0.05075 | 0.0019 | 0.2469 | 0.0082 | 0.03529 | 0.00054 | 48 | 224 | 229 | 7 |
| 11124/1-06 | 41 | 308 | 259 | 0.84 | 0.1149 | 0.0037 | 0.5533 | 0.0112 | 0.03481 | 0.00054 | 17 | 447 | 1879 | 7 |
| 11124/1-07 | 22 | 115 | 133 | 1.15 | 0.1750 | 0.0057 | 0.8620 | 0.0169 | 0.03564 | 0.00057 | 15 | 631 | 2607 | 9 |

续表 1

| 测试点号 | 元素含量(10^{-6})及比值 | | | | 同位素比值及误差 | | | | 表面年龄/Ma | | | | | | | |
|------------|----------------------|-------------------|------------------|------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----|----|
| | ^{206}Pb | ^{232}Th | ^{238}U | Th/U | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1σ | | |
| 11124/1-08 | 46 | 311 | 275 | 0.88 | 0.05095 | 0.00156 | 0.2573 | 0.00681 | 0.03662 | 0.00054 | 239 | 35 | 232 | 5 | 232 | 3 |
| 11124/1-09 | 36 | 265 | 229 | 0.86 | 0.05094 | 0.00173 | 0.2587 | 0.00780 | 0.03684 | 0.00056 | 238 | 42 | 234 | 6 | 233 | 3 |
| 11124/1-10 | 53 | 242 | 225 | 0.93 | 0.05225 | 0.0046 | 0.2691 | 0.02287 | 0.03736 | 0.00088 | 296 | 150 | 242 | 18 | 236 | 5 |
| 11124/1-11 | 120 | 1295 | 878 | 0.68 | 0.07169 | 0.00277 | 0.3938 | 0.01125 | 0.03979 | 0.00065 | 977 | 33 | 337 | 8 | 252 | 4 |
| 11124/1-12 | 71 | 615 | 358 | 0.58 | 0.04605 | 0.00275 | 0.1926 | 0.01104 | 0.03033 | 0.00050 | 0 | 130 | 179 | 9 | 193 | 3 |
| 11124/1-13 | 22 | 111 | 126 | 1.14 | 0.05355 | 0.00394 | 0.2594 | 0.01757 | 0.03512 | 0.00075 | 352 | 115 | 234 | 14 | 223 | 5 |
| 11124/1-14 | 79 | 776 | 568 | 0.73 | 0.06407 | 0.00226 | 0.3074 | 0.00740 | 0.03480 | 0.00055 | 744 | 26 | 272 | 6 | 221 | 3 |
| 11124/1-15 | 29 | 149 | 178 | 1.19 | 0.07087 | 0.00313 | 0.3509 | 0.01237 | 0.03592 | 0.00063 | 954 | 44 | 305 | 9 | 227 | 4 |
| 11124/1-16 | 20 | 87 | 107 | 1.23 | 0.05265 | 0.00281 | 0.2544 | 0.01170 | 0.03506 | 0.00064 | 314 | 71 | 230 | 9 | 222 | 4 |
| 11124/1-17 | 63 | 596 | 414 | 0.69 | 0.04605 | 0.00283 | 0.2177 | 0.01289 | 0.03429 | 0.00057 | 456 | 135 | 200 | 11 | 217 | 4 |
| 11124/1-18 | 109 | 263 | 217 | 0.83 | 0.5826 | 0.01746 | 9.287 | 0.1450 | 0.1157 | 0.00181 | 4465 | 42 | 2367 | 14 | 706 | 10 |
| 11124/1-19 | 87 | 929 | 602 | 0.65 | 0.04562 | 0.00172 | 0.2044 | 0.00564 | 0.03254 | 0.00052 | 22 | 28 | 189 | 5 | 206 | 3 |
| 11124/1-20 | 22 | 117 | 135 | 1.15 | 0.05132 | 0.00195 | 0.2497 | 0.00871 | 0.03527 | 0.00058 | 255 | 50 | 226 | 7 | 223 | 4 |
| 11124/1-21 | 17 | 97 | 109 | 1.12 | 0.08288 | 0.00355 | 0.3964 | 0.01330 | 0.03473 | 0.00061 | 1266 | 39 | 339 | 10 | 220 | 4 |
| 11124/1-22 | 51 | 279 | 309 | 1.11 | 0.06772 | 0.00234 | 0.3281 | 0.00750 | 0.03520 | 0.00057 | 860 | 23 | 288 | 6 | 223 | 4 |
| 11124/1-23 | 17 | 96 | 100 | 1.04 | 0.05168 | 0.00602 | 0.2459 | 0.02820 | 0.03452 | 0.00072 | 271 | 263 | 223 | 23 | 219 | 4 |
| 11124/1-24 | 274 | 491 | 307 | 0.63 | 0.5151 | 0.01569 | 9.341 | 0.1519 | 0.1318 | 0.00211 | 4284 | 44 | 2372 | 15 | 798 | 12 |
| 11124/1-25 | 85 | 750 | 546 | 0.73 | 0.06380 | 0.00212 | 0.3076 | 0.00638 | 0.03505 | 0.00056 | 22 | 28 | 189 | 5 | 206 | 3 |
| 11124/1-26 | 70 | 608 | 512 | 0.84 | 0.09568 | 0.00341 | 0.4952 | 0.01196 | 0.03763 | 0.00063 | 255 | 50 | 226 | 7 | 223 | 4 |
| 11124/1-27 | 42 | 229 | 197 | 0.86 | 0.2005 | 0.00650 | 1.200 | 0.02303 | 0.04353 | 0.00072 | 2830 | 51 | 800 | 10 | 274 | 4 |

表 2 东昆仑东段和勒冈希里克岩体中花岗闪长岩 (样品 11124/2) 和暗色微粒包体 (11124/1) 中锆石微量及稀土元素 (10^{-6}) 分析结果
Table 2 Zircon trace and REE (10^{-6}) analytical results of Helegang Xiilikete granodiorites (sample 11124/2) and their MME (sample 11124/1) of eastern EKOB

| 分析点 | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | δ Eu | Σ REE | Y | Ti | Ta |
|------------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------------|--------------|---------|--------|------|
| 11124/2-01 | 0.03 | 6.68 | 0.05 | 0.83 | 1.61 | 0.60 | 9.28 | 3.20 | 39.03 | 14.04 | 64.53 | 14.01 | 142.09 | 25.96 | 0.48 | 321.94 | 428.96 | 9.97 | 0.27 |
| 11124/2-02 | 1.84 | 13.38 | 0.36 | 1.77 | 1.57 | 0.68 | 7.46 | 2.59 | 33.52 | 12.94 | 65.35 | 15.74 | 177.34 | 35.64 | 0.61 | 370.17 | 418.65 | 4.63 | 0.40 |
| 11124/2-03 | 2.39 | 12.24 | 0.43 | 2.01 | 0.88 | 0.32 | 4.02 | 1.42 | 18.50 | 7.57 | 41.61 | 10.36 | 121.88 | 25.48 | 0.52 | 249.12 | 254.71 | 3.92 | 0.36 |
| 11124/2-04 | 0.16 | 6.74 | 0.02 | 0.43 | 0.60 | 0.30 | 3.79 | 1.35 | 17.78 | 7.27 | 38.77 | 9.42 | 110.00 | 23.57 | 0.61 | 220.20 | 240.39 | 4.58 | 0.30 |
| 11124/2-05 | 0.01 | 5.65 | 0.04 | 0.66 | 1.20 | 0.63 | 6.14 | 2.30 | 30.92 | 12.56 | 67.20 | 16.24 | 189.73 | 40.79 | 0.71 | 374.06 | 429.01 | 4.31 | 0.29 |
| 11124/2-06 | 0.02 | 11.89 | 0.03 | 0.55 | 1.16 | 0.43 | 7.16 | 2.70 | 36.21 | 14.72 | 77.41 | 18.57 | 210.19 | 43.22 | 0.46 | 424.26 | 483.98 | 3.83 | 0.70 |
| 11124/2-07 | 5.27 | 16.02 | 0.76 | 2.79 | 0.88 | 0.24 | 3.55 | 1.34 | 17.87 | 7.19 | 37.63 | 9.11 | 105.18 | 21.46 | 0.42 | 229.29 | 232.36 | 3.53 | 0.43 |
| 11124/2-08 | 1.62 | 9.91 | 0.55 | 5.83 | 7.78 | 0.38 | 33.62 | 10.30 | 116.17 | 39.02 | 172.71 | 34.93 | 338.72 | 58.48 | 0.07 | 830.02 | 1090.64 | 32.23 | 1.40 |
| 11124/2-09 | 0.02 | 10.76 | 0.19 | 3.43 | 6.34 | 1.56 | 27.15 | 8.71 | 100.71 | 34.67 | 151.71 | 29.89 | 287.04 | 49.53 | 0.36 | 711.72 | 1007.09 | 10.89 | 0.28 |
| 11124/2-10 | 0.01 | 8.67 | 0.07 | 1.16 | 1.94 | 0.73 | 8.59 | 2.94 | 36.58 | 13.75 | 69.47 | 16.43 | 180.74 | 37.31 | 0.55 | 378.40 | 443.52 | 3.55 | 0.28 |
| 11124/2-11 | 0.95 | 12.05 | 0.25 | 1.55 | 1.58 | 0.57 | 7.49 | 2.56 | 32.57 | 12.99 | 67.55 | 16.30 | 185.83 | 38.42 | 0.51 | 380.65 | 425.07 | 2.88 | 0.46 |
| 11124/2-12 | 0.01 | 6.28 | 0.04 | 0.56 | 1.06 | 0.49 | 5.00 | 1.78 | 22.66 | 8.66 | 45.15 | 11.00 | 128.45 | 27.03 | 0.65 | 258.17 | 291.01 | 5.43 | 0.26 |
| 11124/2-13 | 15.56 | 34.79 | 2.23 | 8.97 | 2.43 | 0.76 | 8.39 | 2.75 | 34.05 | 12.97 | 67.48 | 16.14 | 185.20 | 39.04 | 0.52 | 430.76 | 431.07 | 3.40 | 0.37 |
| 11124/2-14 | 0.06 | 8.10 | 0.05 | 0.66 | 1.28 | 0.51 | 6.04 | 2.03 | 26.31 | 10.45 | 54.32 | 12.91 | 147.64 | 30.99 | 0.56 | 301.35 | 338.52 | 4.28 | 0.31 |
| 11124/2-15 | 0.33 | 15.21 | 0.43 | 4.98 | 5.76 | 1.64 | 22.73 | 7.31 | 87.84 | 31.52 | 151.74 | 33.42 | 346.73 | 66.87 | 0.44 | 776.51 | 971.07 | 2.75 | 0.46 |
| 11124/2-16 | 0.01 | 10.63 | 0.03 | 0.54 | 1.00 | 0.43 | 5.68 | 2.19 | 28.59 | 11.36 | 59.83 | 14.40 | 163.95 | 34.05 | 0.56 | 332.69 | 375.01 | 3.34 | 0.48 |
| 11124/2-17 | 1.05 | 11.11 | 0.15 | 1.16 | 1.85 | 0.44 | 14.45 | 6.45 | 92.35 | 39.60 | 202.97 | 45.23 | 472.79 | 92.44 | 0.26 | 982.02 | 1151.58 | 9.77 | 0.38 |
| 11124/2-18 | 0.01 | 8.47 | 0.04 | 0.53 | 0.97 | 0.41 | 5.02 | 1.80 | 23.62 | 9.51 | 50.02 | 12.20 | 141.92 | 30.05 | 0.56 | 284.56 | 312.15 | 3.80 | 0.38 |
| 11124/1-01 | 0.31 | 15.66 | 0.10 | 0.98 | 1.59 | 1.02 | 9.20 | 3.41 | 41.40 | 18.01 | 87.23 | 21.61 | 229.89 | 52.76 | 0.81 | 483.17 | 540.76 | 14.30 | 0.50 |
| 11124/1-02 | 0.03 | 10.42 | 0.03 | 0.64 | 1.32 | 0.99 | 7.94 | 3.06 | 36.73 | 16.96 | 84.56 | 21.49 | 230.82 | 53.84 | 0.94 | 468.82 | 505.59 | 3.78 | 0.38 |
| 11124/1-03 | 0.09 | 7.35 | 0.05 | 0.62 | 1.00 | 0.58 | 4.89 | 1.96 | 24.17 | 10.70 | 54.07 | 13.90 | 156.98 | 37.57 | 0.80 | 313.92 | 325.82 | 14.34 | 0.28 |
| 11124/1-04 | 3.17 | 16.94 | 0.48 | 2.14 | 1.10 | 0.48 | 3.96 | 1.41 | 17.18 | 7.55 | 37.29 | 9.46 | 106.34 | 25.13 | 0.71 | 232.63 | 229.18 | 62.56 | 0.56 |
| 11124/1-05 | 0.41 | 12.06 | 0.11 | 0.96 | 1.50 | 1.01 | 8.22 | 3.17 | 38.64 | 16.96 | 84.15 | 21.06 | 231.27 | 53.40 | 0.88 | 472.92 | 512.89 | 3.96 | 0.41 |
| 11124/1-06 | 14.07 | 15.96 | 1.19 | 4.83 | 3.00 | 1.48 | 11.44 | 3.93 | 44.42 | 18.31 | 87.96 | 21.85 | 242.13 | 54.91 | 0.77 | 525.48 | 560.17 | 34.75 | 0.39 |
| 11124/1-07 | 5.23 | 11.69 | 0.79 | 3.59 | 1.60 | 0.71 | 4.70 | 1.62 | 19.14 | 8.01 | 38.85 | 9.39 | 101.28 | 22.99 | 0.79 | 229.59 | 237.85 | 58.59 | 0.34 |
| 11124/1-08 | 0.03 | 11.55 | 0.12 | 1.68 | 2.47 | 1.34 | 10.60 | 3.73 | 43.03 | 18.04 | 87.93 | 22.27 | 246.04 | 55.54 | 0.80 | 504.37 | 558.49 | 3.01 | 0.33 |
| 11124/1-09 | 0.16 | 10.03 | 0.17 | 1.84 | 2.11 | 1.34 | 10.14 | 3.30 | 37.90 | 15.57 | 71.52 | 17.77 | 191.70 | 42.64 | 0.88 | 406.19 | 460.23 | 3.36 | 0.41 |
| 11124/1-10 | 24.38 | 41.58 | 2.43 | 7.90 | 2.37 | 1.29 | 8.30 | 2.83 | 32.23 | 13.47 | 63.77 | 15.78 | 171.05 | 37.89 | 0.89 | 425.27 | 401.32 | 208.41 | 0.44 |
| 11124/1-11 | 0.24 | 24.73 | 0.46 | 3.77 | 6.44 | 4.19 | 31.96 | 10.58 | 124.21 | 49.12 | 216.71 | 52.91 | 538.01 | 108.51 | 0.89 | 1171.84 | 1394.96 | 9.39 | 0.82 |

续表 2

| 分析点 | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | δEu | ΣREE | Y | Ti | Ta |
|------------|--------|--------|-------|--------|-------|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------------------|--------------------|---------|-------|------|
| 11124/1-12 | 398.33 | 604.36 | 50.22 | 155.32 | 20.14 | 5.37 | 25.19 | 6.67 | 69.59 | 27.09 | 127.41 | 32.17 | 345.72 | 74.93 | 0.73 | 1942.51 | 835.78 | 15.22 | 0.57 |
| 11124/1-13 | 2.53 | 9.56 | 0.41 | 2.37 | 1.16 | 0.56 | 4.15 | 1.48 | 17.82 | 7.35 | 35.19 | 9.15 | 102.08 | 22.86 | 0.79 | 216.67 | 221.31 | 36.91 | 0.21 |
| 11124/1-14 | 0.41 | 28.24 | 0.82 | 10.22 | 11.93 | 4.37 | 42.28 | 13.16 | 136.05 | 50.99 | 218.08 | 51.92 | 545.05 | 106.07 | 0.60 | 1219.59 | 1549.65 | 4.51 | 0.57 |
| 11124/1-15 | 0.83 | 8.54 | 0.10 | 0.88 | 0.95 | 0.62 | 4.98 | 1.92 | 24.37 | 10.27 | 51.61 | 13.24 | 144.71 | 32.48 | 0.88 | 295.50 | 320.75 | 8.37 | 0.29 |
| 11124/1-16 | 1.20 | 6.43 | 0.23 | 1.30 | 0.88 | 0.41 | 2.90 | 1.07 | 12.64 | 5.48 | 26.87 | 6.84 | 75.14 | 17.36 | 0.79 | 158.75 | 167.85 | 3.07 | 0.19 |
| 11124/1-17 | 0.11 | 19.80 | 0.31 | 4.27 | 5.30 | 2.71 | 21.52 | 7.14 | 78.31 | 30.25 | 136.57 | 34.24 | 358.77 | 76.24 | 0.78 | 775.54 | 913.66 | 3.75 | 0.40 |
| 11124/1-18 | 51.27 | 58.57 | 4.50 | 15.65 | 3.35 | 1.23 | 7.05 | 2.26 | 25.55 | 10.77 | 52.91 | 13.74 | 153.34 | 34.69 | 0.77 | 434.88 | 327.87 | 48.83 | 0.60 |
| 11124/1-19 | 0.11 | 24.08 | 0.41 | 4.85 | 6.42 | 3.60 | 25.39 | 8.23 | 91.79 | 36.29 | 157.98 | 39.36 | 403.46 | 82.17 | 0.86 | 884.14 | 1051.14 | 5.41 | 0.57 |
| 11124/1-20 | 0.29 | 8.27 | 0.08 | 0.97 | 1.41 | 0.54 | 7.09 | 2.36 | 28.82 | 12.10 | 56.59 | 14.24 | 157.84 | 34.23 | 0.52 | 324.83 | 361.09 | 4.30 | 0.31 |
| 11124/1-21 | 10.02 | 17.33 | 0.92 | 3.00 | 0.94 | 0.45 | 3.37 | 1.23 | 15.19 | 6.63 | 31.93 | 8.05 | 88.29 | 19.62 | 0.78 | 206.98 | 195.93 | 19.70 | 0.28 |
| 11124/1-22 | 0.03 | 9.25 | 0.09 | 1.41 | 1.88 | 0.95 | 7.75 | 2.70 | 32.91 | 13.93 | 66.96 | 17.04 | 192.90 | 43.54 | 0.76 | 391.34 | 422.22 | 2.76 | 0.33 |
| 11124/1-23 | 27.54 | 34.11 | 1.97 | 6.07 | 1.35 | 0.65 | 3.99 | 1.28 | 14.67 | 5.96 | 29.74 | 7.59 | 84.55 | 18.32 | 0.85 | 237.79 | 182.70 | 3.72 | 0.17 |
| 11124/1-24 | 19.09 | 35.01 | 2.98 | 13.53 | 4.71 | 2.34 | 13.38 | 4.23 | 46.19 | 18.11 | 82.25 | 19.99 | 210.96 | 43.18 | 0.90 | 515.95 | 537.64 | 46.82 | 0.30 |
| 11124/1-25 | 15.04 | 48.28 | 2.44 | 9.08 | 3.43 | 1.15 | 12.45 | 5.16 | 61.85 | 25.81 | 124.59 | 30.64 | 332.37 | 65.42 | 0.54 | 737.71 | 783.16 | 9.47 | 0.74 |
| 11124/1-26 | 0.16 | 15.31 | 0.26 | 3.09 | 4.05 | 2.30 | 16.60 | 6.05 | 70.62 | 28.41 | 134.84 | 34.06 | 366.70 | 70.78 | 0.86 | 753.23 | 834.44 | 3.72 | 0.58 |
| 11124/1-27 | 86.30 | 135.42 | 11.97 | 42.25 | 6.84 | 1.05 | 9.85 | 2.65 | 27.48 | 10.95 | 50.97 | 12.50 | 134.23 | 28.88 | 0.39 | 561.34 | 324.74 | 33.74 | 0.40 |

表 3 东昆仑东段和勒冈希里克特花岗闪长岩体和暗色微粒包体主量元素(%)
和微量元素(10⁻⁶)分析结果

Table3 Major(%) and trace element (10⁻⁶) analysis results for the Helegang Xilikete
granodiorites and their MME of eastern EKOB region

| 分析项目 | 2616/1 | 3755/1 | 3756/1 | 11124/1 | 11124/2 | 分析项目 | 2616/1 | 3755/1 | 3756/1 | 11124/1 | 11124/2 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 花岗 闪长岩 | 花岗 闪长岩 | 花岗 闪长岩 | 闪长 质包体 | 花岗 闪长岩 | | 花岗 闪长岩 | 花岗 闪长岩 | 花岗 闪长岩 | 花岗 闪长岩 | 闪长 质包体 |
| SiO ₂ | 67.12 | 68.46 | 67.97 | 52.01 | 67.58 | Sb | 0.32 | 0.24 | 0.21 | 0.45 | 0.28 |
| TiO ₂ | 0.39 | 0.34 | 0.38 | 0.68 | 0.38 | Cs | 3.12 | 3.38 | 3.20 | 2.78 | 2.91 |
| Al ₂ O ₃ | 15.02 | 14.86 | 15.01 | 14.86 | 15.10 | Ba | 934.00 | 982.00 | 919.00 | 442.00 | 786.00 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.89 | 1.57 | 1.69 | 2.02 | 1.58 | La | 26.60 | 28.30 | 24.10 | 38.30 | 31.30 |
| FeO | 1.69 | 1.53 | 1.76 | 7.16 | 1.88 | Ce | 41.90 | 43.70 | 39.20 | 70.40 | 50.00 |
| MnO | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.18 | 0.06 | Pr | 4.36 | 4.42 | 4.25 | 8.04 | 5.09 |
| MgO | 2.26 | 1.91 | 2.03 | 7.72 | 2.17 | Nd | 15.70 | 14.60 | 14.90 | 29.80 | 17.40 |
| CaO | 3.73 | 3.33 | 3.64 | 8.53 | 3.73 | Sm | 2.72 | 2.43 | 2.58 | 5.36 | 2.79 |
| Na ₂ O | 3.43 | 3.46 | 3.46 | 2.70 | 3.44 | Eu | 0.79 | 0.73 | 0.81 | 1.51 | 0.80 |
| K ₂ O | 3.06 | 3.43 | 3.16 | 1.96 | 3.08 | Gd | 2.28 | 2.13 | 2.24 | 4.92 | 2.35 |
| P ₂ O ₅ | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.13 | 0.10 | Tb | 0.37 | 0.34 | 0.35 | 0.82 | 0.36 |
| LOI | 1.22 | 1.16 | 0.82 | 1.02 | 1.02 | Hf | 1.47 | 2.04 | 1.57 | 1.73 | 1.19 |
| TOTAL | 99.96 | 100.18 | 100.06 | 100.12 | 100.12 | Dy | 1.94 | 1.84 | 1.89 | 4.83 | 1.91 |
| Li | 26.40 | 26.90 | 24.60 | 23.00 | 24.90 | Ho | 0.36 | 0.36 | 0.34 | 0.90 | 0.36 |
| Be | 0.63 | 1.15 | 1.34 | 1.20 | 1.43 | Er | 1.10 | 0.97 | 1.03 | 2.68 | 1.00 |
| Sc | 8.25 | 7.17 | 8.07 | 29.50 | 7.61 | Tm | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.42 | 0.16 |
| V | 59.70 | 65.50 | 78.90 | 213.00 | 69.40 | Yb | 1.09 | 1.08 | 1.10 | 2.87 | 1.05 |
| Cr | 72.20 | 63.30 | 67.90 | 383.00 | 71.90 | Lu | 0.18 | 0.19 | 0.19 | 0.40 | 0.15 |
| Co | 10.30 | 9.16 | 9.96 | 40.10 | 9.78 | Ta | 0.62 | 0.86 | 0.74 | 0.48 | 0.71 |
| Ni | 14.20 | 11.30 | 12.90 | 84.90 | 15.80 | W | 0.51 | 0.66 | 0.43 | 0.62 | 0.83 |
| Cu | 3.63 | 8.07 | 2.58 | 280.00 | 7.35 | Tl | 0.55 | 0.63 | 0.58 | 0.45 | 0.43 |
| Zn | 34.60 | 31.50 | 33.00 | 151.00 | 56.30 | Pb | 12.80 | 13.70 | 14.40 | 17.20 | 15.70 |
| Ga | 17.60 | 17.20 | 18.50 | 18.10 | 16.20 | Bi | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.21 | 0.06 |
| Rb | 116.00 | 141.00 | 119.00 | 79.40 | 93.70 | Th | 13.10 | 18.50 | 13.30 | 4.41 | 14.00 |
| Sr | 389.00 | 365.00 | 393.00 | 358.00 | 348.00 | U | 1.20 | 2.59 | 0.97 | 1.05 | 1.09 |
| Y | 10.30 | 10.20 | 10.10 | 25.90 | 10.10 | Zr | 141.59 | 128.80 | 140.53 | 94.69 | 131.51 |
| Nb | 8.57 | 8.89 | 8.98 | 8.26 | 8.39 | Rb/Sr | 0.30 | 0.39 | 0.30 | 0.22 | 0.27 |
| Mo | 0.26 | 0.12 | 0.26 | 0.31 | 0.38 | Nb/Ta | 13.89 | 10.39 | 12.15 | 17.28 | 11.85 |
| Cd | 0.01 | 0.03 | 0.00 | 0.14 | 0.03 | Mg [#] | 54 | 54 | 53 | 62 | 54 |
| In | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.10 | 0.02 | δ Eu | 0.98 | 0.98 | 1.03 | 0.90 | 0.95 |

注: δ Eu=Eu_N/(Sm_N+Gd_N)^{1/2}, Mg[#]=100×Mg²⁺/(Mg²⁺+Fe²⁺)。

Ca、P ($\text{FeO}^T=9.18\%$; $\text{MgO}=7.72\%$; $\text{Mg}^\# = 62$; $\text{TiO}_2 = 0.68\%$; $\text{CaO}=8.53\%$; $\text{Na}_2\text{O}(2.70\%)$ 和 $\text{K}_2\text{O}(1.96\%)$ 含量小于寄主岩, $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})=4.66\%$, 暗色微粒包体的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}(1.37)$ 比值和 $\text{Mg}^\#$ 值(62)明显高于寄主岩, $\text{Mg}^\#$ 值略低于原生玄武质岩浆(68~75)^[43]。

在 SiO_2 -ALK 图解中(图 5), 和勒冈希里克特花岗闪长岩体落入到了花岗岩、花岗闪长岩范围, 主要岩性为花岗闪长岩, 暗色微粒包体落入到了辉长岩范围, 与镜下鉴定结果不同, 这可能是因为是在造山带地区, 基性岩浆的源区富含水, 从岩浆中结晶出来的矿物是含水矿物角闪石和黑云母, 而不是辉石。暗色微粒包体和寄主岩在 A/CNK-A/NK 图解中(图 6-A) 全都落入准铝质范围, SiO_2 - K_2O 岩石分类图(图 6-B)中落入高钾钙碱性范围。

5.2 微量元素

和勒冈希里克特花岗闪长岩体的寄主岩和暗色微粒包体在球粒陨石标准化稀土元素配分图上具有相似的配分模式(图 7-A), 富集 LREE, 亏损 HREE, 轻重稀土分馏明显。暗色微粒包体的稀土总量(171.25×10^{-6})高于寄主花岗岩(平均 102.17×10^{-6}), 寄主岩表现出轻微的 Eu 负异常和正异常, 暗色微粒包体的 Eu 负异常较寄主岩明显, 二者的 δEu 值变

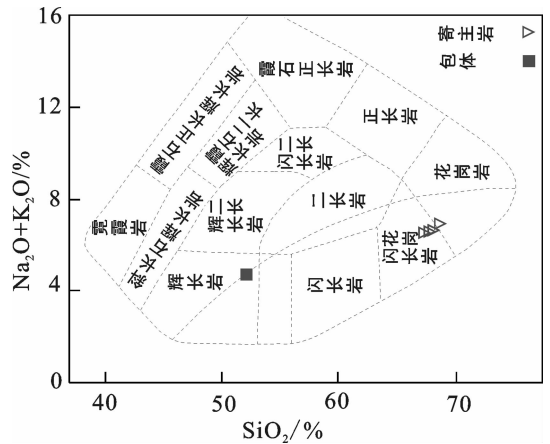


图 5 和勒冈希里克特花岗闪长岩和暗色微粒包体的 SiO_2 -ALK 分类命名图解^[44]
Fig.5 SiO_2 -ALK classifying-naming diagram of Helegang Xilikete granodiorites and their MEE (after Wilson^[44])

化范围不大。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 7-D), 寄主岩体和暗色微粒包体具有相似的趋势, 均富集不相容元素 Cs、Rb、Th、K 和亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ti、P、Ta; 但寄主岩的不相容元素富集程度比包体稍强; 暗色微粒包体的高场强元素亏损程度较弱。

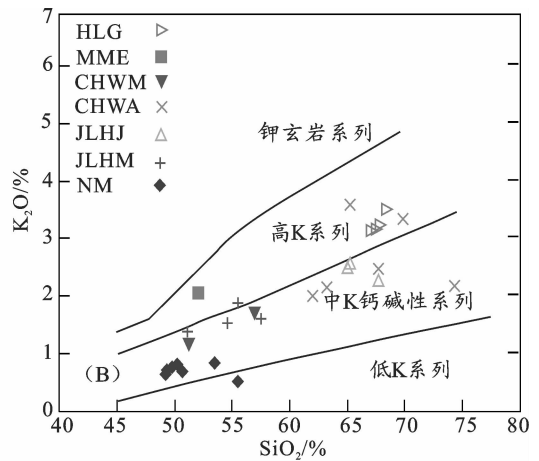
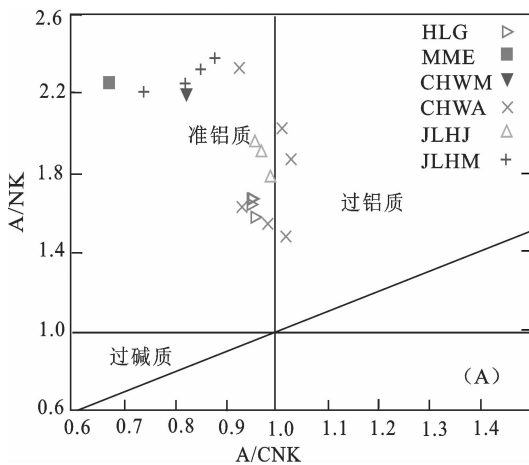


图 6 (A) 和勒冈希里克特花岗闪长岩、暗色微粒包体及东昆仑东段其他岩体的 A/CNK-A/NK 图解(据[45]);

(B) 和勒冈希里克特花岗闪长岩、暗色微粒包体及东昆仑东段其他岩体的 SiO_2 - K_2O 图解(据[46])

MME—和勒冈希里克特花岗闪长岩暗色微粒包体; HLG—和勒冈希里克特花岗闪长岩; CHWM—约格魯杂岩中基性岩^[41]; CHWA—约格魯杂岩中酸性岩^[41]; JLHJ—加鲁河杂岩寄主岩(裴先治, 未刊资料); JLHM—加鲁河杂岩暗色微粒包体(裴先治, 未刊资料); NM—白日其利基性岩脉^[47]

Fig.6 (A) A/CNK-A/NK diagram of Helegang Xilikete granodiorites, their MEE and other plutons in EKOB (after Maniar et al.^[45]); (B) SiO_2 - K_2O diagram of Helegang Xilikete granodiorites and their MEE and other plutons in eastern EKOB (after Rollinson^[46])

6 讨论

6.1 岩浆成因

典型的埃达克质岩石具有 $SiO_2 > 56\%$, $Al_2O_3 > 16\%$, 较高的 $Sr (> 400)$ 和 Sr/Y 和 La/Y 比值 ($20 \sim 40$ 和 > 20), 较低的 $Y (\leq 18 \times 10^{-6})$ 、 $Yb (\leq 1.9 \times 10^{-6})$ [49]。和勒冈希里克特花岗闪长岩体的高 Na_2O 、 Sr/Y 、 La/Yb 和 Sr 含量, 相对于轻稀土和中稀土元素重稀土元素亏损, 轻微的 Eu 负异常和正异常 (图 7-A), 并且重稀土元素 Yb 和 Y 的含量很低, 具有与埃达克质岩石类似的地球化学特征。在 $Yb_N - (La/Yb)_N$ 和 $Y - Sr/Y$ 图解中 (图 8), 多位于埃达克岩和岛弧岩浆岩的过渡区, 有着过渡型的成因特征。

关于埃达克质岩石有以下几种成因模式: ①俯冲年轻洋壳的熔融 [49]; ②玄武质岩浆的分离结晶 [50]; ③拆沉下地壳熔融 [51]。已有的资料表明在晚三叠世, 阿尼玛卿—布青山洋已经闭合, 所以和勒冈希里克特花岗闪长岩不可能是俯冲年轻洋壳熔融形成的。

在勒冈希里克特花岗闪长岩体周围没有大面积的基性岩出露, 玄武质岩浆的分离结晶作用不能解释和勒冈希里克特岩体的成因。从球粒陨石标准化稀土元素配分图中轻重稀土元素分馏较强, 表明源区的残留相中含有石榴子石和少量的角闪石, 实验岩石学资料表明, 石榴子石的稳定压力一般在 1.5 GPa; Eu 轻微的正异常或负异常, 表明源区中没有或只有少量的斜长石残留, 由以上说明了岩石的形成深度较大, 估计在 50 km。和勒冈希里克特花岗闪长岩体 Nb/Ta 的平均值为 12.07, 接近于大陆地壳的比值 $10 \sim 14$ [52-53]。岩体的 $Mg^\#$ 大于 52, 高于下地壳部分熔融形成的岩浆, 并且其 Cr 、 Ni 含量相对较高, 说明原始岩浆中有富镁铁质的熔体加入。因此, 和勒冈希里克特花岗闪长岩体可能是陆壳加厚之后由挤压转入后碰撞拉伸阶段岩浆活动的产物。由于加厚地壳拆沉诱发的地幔减压熔融, 产生了基性岩浆, 基性岩浆底侵下地壳使其部分熔融产生了长英质岩浆, 二者不完全混合生成了暗色微粒包体, 并使

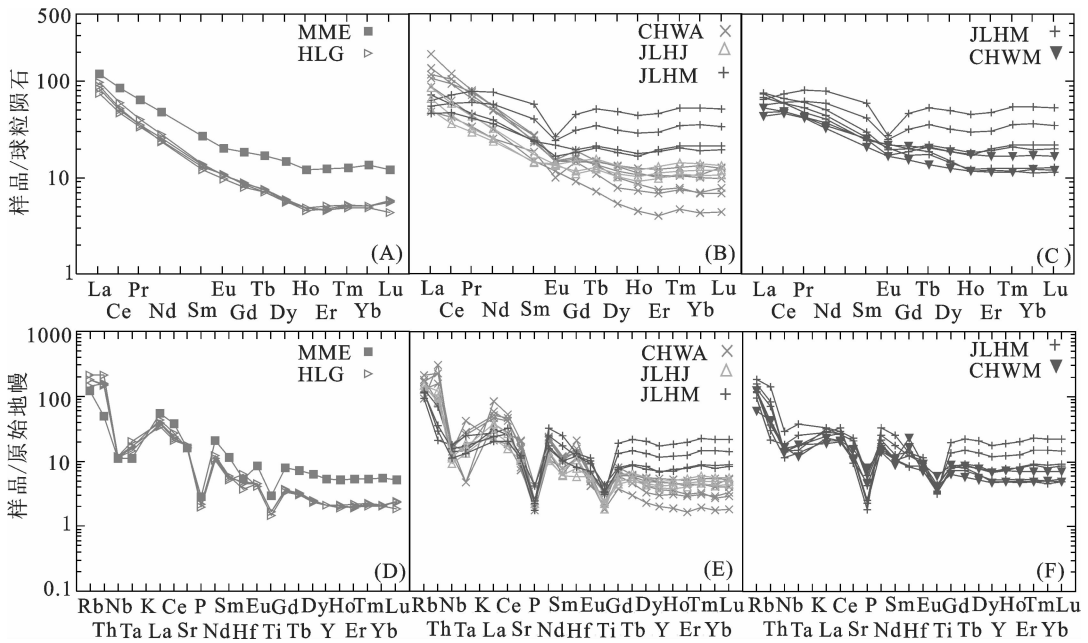


图 7 和勒冈希里克特花岗闪长岩及其他地区花岗质岩体的球粒陨石标准化稀土元素配分图解 (球粒陨石标准化数据引自 [42]) 和原始地幔标准化不相容元素蛛网图解 (原始地幔标准化数据引自 [48])

MME—和勒冈希里克特花岗闪长岩暗色微粒包体; HLG—和勒冈希里克特花岗闪长岩; CHWM—约格鲁杂岩中基性岩, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $240Ma$ [30-31]; CHWA—约格鲁杂岩中酸性岩 [30-31]; JLHJ—加鲁河杂岩寄主岩 (裴先治, 未刊资料); JLHM—加鲁河杂岩暗色微粒包体 (裴先治, 未刊资料)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (chondrite-normalized data after Boynton [42]) and primitive mantle-normalized incompatible elements spider diagram (primitive mantle-normalized data after [48]) of Helegang Xilikete granodiorites and granitic rocks from other regions

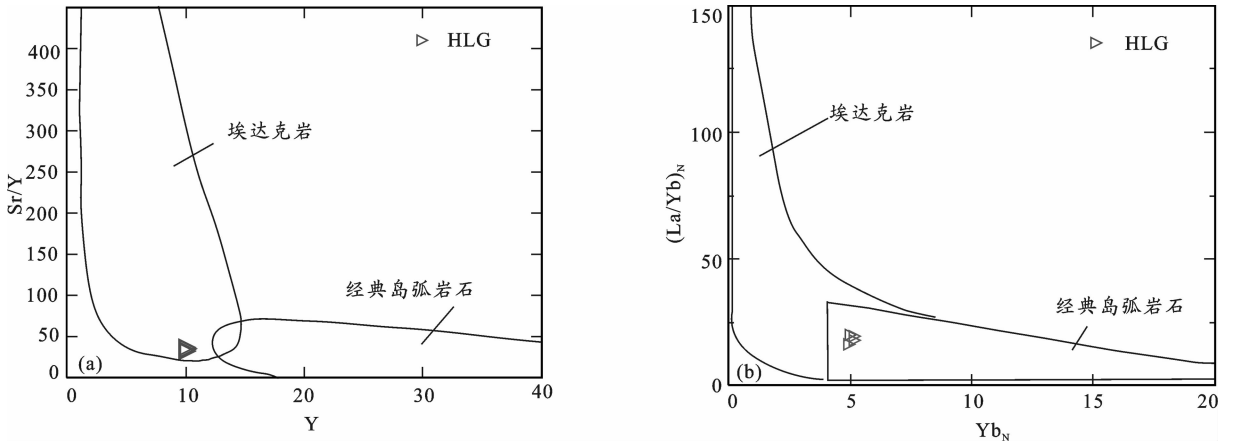


图 8 和勒冈希里克特花岗闪长岩的 Y-Sr/Y 图解 (a)(底图据[55]);及 $Yb_N-(La/Yb)_N$ 图解(b)(底图据[55], 埃达克岩和经典岛弧岩石的范围引自[49]和[56])

Fig.8 (a) Y-Sr/Y diagram of Helegang Xilikete granodiorites (the underneath diagram modified after [55]); (b) $Yb_N-(La/Yb)_N$ diagram of Helegang Xilikete granodiorites (the underneath diagram modified after [55]; the content ranges of adakite and typical island-arc rocks modified after [49] and [56])

寄主岩的 $Mg^\#$ 、Cr、Ni 升高。

6.2 岩浆混合作用

6.2.1 岩浆混合的岩石学和矿物学标志

和勒冈希里克特花岗闪长岩体中发育大量暗色微粒包体。包体基质中的斜长石和暗色矿物自形至半自形细粒结构,斜长石斑晶的生长震荡环带是他们从硅酸盐熔浆中直接晶出的证据,是岩浆岩的典型特征。包体中一些矿物粒度比寄主花岗岩小很多,这是否定同源说或堆积说的重要依据。暗色微粒包体中的细小反向脉,其成分为花岗质,细粒结构为主;是偏基性熔浆在花岗质熔浆中快速冷却并产生裂隙,花岗质熔浆则因受到中基性熔浆加热而降低黏度,并很容易贯入到这些裂隙中生成的。部分暗色微粒包体与寄主岩的界线整体比较清晰,边部颗粒较中间细小,说明是基性岩浆混入酸性岩浆快速冷凝的结果;但有的界线较模糊呈渐变过渡关系,可能说明两种岩浆的温度差别不大,即花岗质熔浆处于过热的状态发生了岩浆混合作用^[57]。这说明岩浆混合作用不是简单的单一过程,可能是复杂的多期次作用过程。

在暗色微粒包体和寄主岩中斜长石异常环带发育,可分为核部和边部。核部成分相对均一,边部与正常环带结构一致,两者界线清晰,这些异常环带可能是斜长石的生长环境发生了突变的结果^[58],斜长石的生长震荡环带及增生边现象进一步证实了不同温度岩浆混合及结晶过程。暗色微粒包体中斜长石

往往包裹角闪石、黑云母、石英、磷灰石和榍石等矿物,形成包含镶嵌结构,这些包裹体有的呈针状或长条状,矿物颗粒相对细小,这表明在发生岩浆混合作用时,形成暗色微粒包体的岩浆液滴中晶核的生长速度很大,大量的矿物几乎同时结晶形成颗粒细小的矿物。磷灰石在缓慢结晶时,一般发育成粗短的、具圆化边的晶体,长宽比从 3:1 到 5:1,而在快速冷却时,结晶的磷灰石长宽比可达 20:1,且晶面平整,同时具有清楚的底面解理,因此,暗色微粒包体中针状磷灰石是温度较高的偏基性岩浆和温度较低的中酸性岩浆混合的产物^[59-61]。

在寄主岩中,可以看到石英呈他形粒状分布于斜长石间隙之中,但是在斜长石和石英的边部可以看到一些更为细小的石英颗粒,通过与分布于斜长石中的石英对比,他们不是同一期形成的,这些小的石英颗粒可能是受到外来的热扰动作用活化的产物,而且在原生的石英颗粒边部可以见到熔蚀现象,也说明了有后期热扰动影响,岩浆混合作用可以很好地解释这种现象。角闪石存在热的增生边,黑云母常可见边缘被熔蚀成锯齿状,存在交代穿孔结构,是早期形成的黑云母和角闪石矿物由于较热的岩浆混入被熔蚀而成的^[62]。石英、黑云母和角闪石的这些特征可能是发生岩浆混合作用的直接证据。

暗色微粒包体和寄主岩的宏观和微观特征表明,暗色微粒包体不是残留体,也不是早期分凝的堆积体,在岩体中也没有出露相仿岩石成分和结构的

边缘相,因此也不像是早期结晶相的岩石碎块,一种可能的方式是,他们有着不同的岩浆源区,是岩浆混合的产物。由于两种岩浆的温度的不同,岩浆按混合的机制不同,可以分为化学混合和机械混合两种^[2,21]。从和勒冈希里克特花岗闪长岩体的野外现象和岩相学特征来看,应属于少量基性岩浆注入大量酸性岩浆的机械混合。

6.2.2 岩浆混合的岩石地球化学标志

在稀土元素配分图中,寄主岩和暗色微粒包体有着近相似的趋势,只是含量高低有所差异,这可能说明他们有着相同的岩浆演化过程,也就是说寄主岩和暗色微粒包体可能是同源岩浆演化的,但是暗色微粒包体的稀土元素含量远大于寄主岩,相似的稀土元素配分趋势可能是由于岩浆混合作用使元素在两种岩浆中相互交换、分配的结果,而不是同源岩浆早期结晶的产物。暗色微粒包体稀土元素含量和Eu负异常大于寄主岩,也说明二者不是同源岩浆分异结晶的产物,因为在同源岩浆演化,越后期其稀土元素含量越高,随着斜长石的分离结晶,残余岩浆Eu的负异常应该是逐渐明显。和勒冈希里克特花岗闪长岩体寄主岩和暗色微粒包体的微量元素蛛网图有着相似的趋势,都表现出富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,说明两者可能通过混合作用和双扩散作用,存在着物质成分的交换。

6.2.3 岩浆混合的同位素地质年代学标志

暗色微粒包体的锆石U-Pb年龄为(224.9±4.1)Ma,与寄主岩的锆石U-Pb年龄(225±5)Ma在误差范围内一致,这就排除了寄主岩中的暗色微粒包体为源区的固态难熔残余或围岩捕虏体的可能性,因为不论是花岗质岩浆的源岩还是围岩捕虏体,其形成年龄均应早于寄主岩岩浆的形成年龄,同时也排除了基性岩浆在花岗质岩浆固结后才侵入的可能^[61]。寄主岩和暗色微粒包体具有近一致的年龄,一种合理的解释是暗色微粒包体为酸性与基性岩浆发生岩浆混合作用的产物。

6.3 构造背景

东昆仑地区广泛出露晚华力西期—印支期的岩浆岩,通过总结前人的研究成果和近期笔者取得的资料^[25-32,63-79](裴先治,未刊资料),可将该期的岩浆活动分为两个阶段:260~240 Ma和225~190 Ma。通过对比他们的岩石地球化学特征研究,表明他们有着不同的成因。熊富浩等^[67]通过对东昆仑造山带白

日其利基性岩墙251 Ma的研究,认为其形成于俯冲作用导致的区域伸展作用下受板片流体交代的地幔楔部分熔融,与阿尼玛卿—布青山洋的俯冲作用有关;孙雨等^[32]通过对哈拉尕吐花岗岩体的岩相学和锆石U-Pb年代学252 Ma研究表明该岩体是俯冲洋壳脱水产生的流体导致地幔楔熔融,然后底侵下地壳使其部分熔融的产物;陈能松等^[75]通过对东昆仑造山带中云母片岩的独居石电子探针化学年龄的研究,也证实了东昆仑地区在246 Ma存在着洋壳俯冲导致变质作用。在这一时期东昆仑南缘地区普遍发育一套早中三叠世弧前盆地沉积体系,从沉积角度说明了东昆仑地区处于俯冲环境。这些研究成果说明在这一阶段东昆仑南缘地区的岩浆作用是由于阿尼玛卿—布青山洋的俯冲作用导致的。

对东昆仑东段岩浆作用的对比可以看出(图7-A~E),两阶段的岩浆岩有着不同的地球化学特征,说明他们有着不同的成因。第一阶段东昆仑地区的岩浆岩大部分落入到低钾钙碱性到中钾钙碱性区域,符合俯冲作用导致弧岩浆岩特征,而第二阶段的岩浆岩都落入到了高钾钙碱性区域,并且在这一时期东昆仑地区广泛出露各种成因的高钾钙碱性岩浆岩,说明了在这一时期东昆仑地区处于后碰撞阶段^[72,80-82]。在东昆仑地区,由于巴颜喀拉地块和东昆仑地块的碰撞,使希里克特组只是局部的出露,东昆仑地区零星分布的晚三叠世—侏罗纪前陆盆地—断陷盆地说明了在这一时期东昆仑地区进入到了后碰撞阶段^[83]。通过对勒冈希里克特花岗闪长岩体锆石U-Pb年代学和岩石地球化学的研究,表明该岩体是东昆仑地区进入到了后碰撞阶段以后,由于加厚下地壳拆沉造成的基性岩浆底侵下地壳并发生岩浆混合的产物,暗色微粒包体是拆沉作用导致基性端元注入酸性端元的产物。

在西昆仑地区有着与东昆仑相似的华力西期—印支期岩浆活动^[84-85],其中发育较多晚古生代到早三叠世与洋壳俯冲作用相关的弧岩浆岩,与中三叠世板块的闭合碰撞相关的S型花岗岩^[86],以及晚三叠世后碰撞的走滑拉伸作用导致的高钾钙碱性岩浆岩^[87-88]。以上研究成果表明东西昆仑在这一时期存在相似的构造演化,具有一定的对比性,说明两者拥有统一的地球动力学背景,受控于古特提斯构造域,是冈瓦纳大陆向北漂移,同欧亚大陆碰撞的结果。和勒冈希里克特花岗闪长岩体及其暗色微量包体的研

究结果表明,在晚三叠世东昆仑东段地区已经进入了后碰撞阶段。

7 结 论

(1)东昆仑造山带东段和勒冈希里克特花岗闪长岩中发育大量暗色微粒包体,岩相学特征表明其可能为岩浆混合作用的产物。

(2)寄主岩及其暗色微粒包体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $(225 \pm 5)\text{Ma}$ 、 $(224.9 \pm 4.1)\text{Ma}$,均为晚三叠世早期的产物,进一步从结晶年龄方面证明了岩浆混合作用的存在。

(3)寄主花岗闪长岩体及其暗色微粒包体的岩石地球化学特征表明其形成于岩浆底侵作用,可能与加厚地壳拆沉导致的后碰撞作用有关,说明东昆仑地区在晚三叠世早期已经进入后碰撞构造阶段。

致谢: 锆石 U-Pb 定年工作得到西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明博士、第五春荣博士和袁洪林教授的大力支持和帮助。参加野外工作的还有丁仁平高级工程师、郭俊锋副教授、冯建赟博士、孙雨硕士、张亚峰硕士、张晓飞硕士、刘智刚硕士等,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] Pitcher W S. Granites and yet more granites forty years on [J]. Geol. Rundschau, 1987, 76:51-79.
- [2] 马昌前. 造山岩套中镁铁质和长英质岩浆的相互作用研究进展 [J]. 地质科技情报, 2003, 22(3):1-8.
Ma Changqian. Advances in study on the interaction between mafic and felsic magmas in orogenic suites [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(3):1-8(in Chinese with English abstract).
- [3] 王德滋,周新民,徐夕生,等. 微粒花岗岩类包体的成因 [J]. 桂林冶金地质学院学报, 1992, 12(3):235-241.
Wang Dezi, Zhou Xinmin, Xu Xisheng, et al. On Geneses of microgranitoid enclaves [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 1992, 12 (3):235-241 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王德滋,周金城,邱检生,等. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩特征与成因 [J]. 高校地质学报, 2000, 6(4):488-497.
Wang Dezi, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, et al. Characteristics and petrogenesis of Late Mesozoic granitic volcanic-intrusive complexes in Southeastern China [J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(4):488-497(in Chinese with English abstract).
- [5] 王德滋,沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化 [J]. 地学前缘, 2003, 3(10):209-220.
Wang Dezi, Shen Weizhou. Genesis of granitoids and crustal

- evolution in southeast China [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 3 (10):209-220(in Chinese with English abstract).
- [6] 王涛. 花岗岩混合成因研究及大陆动力学意义 [J]. 岩石学报, 2000, 16:161-166.
Wang Tao. Origin of hybrid granitoids and the implications for continental dynamics [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16:161-166 (in Chinese with English abstract).
- [7] 肖庆辉,邱瑞照,邓晋福,等. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究 [J]. 中国地质, 2005, 32(3):343-351.
Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, et al. Granitoids and continental crustal growth modes in China [J]. Geology in China, 2005, 32(3):343-351(in Chinese with English abstract).
- [8] 肖庆辉,邱瑞照,邢作云,等. 花岗岩成因研究前沿的认识 [J]. 地质论评, 2007, 53(1):17-26.
Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Xing Zuoyun, et al. Major frontiers on stydies granite formation [J]. Geological Review, 2007, 53(1): 17-26(in Chinese with English abstract).
- [9] 肖庆辉,邓晋福,邱瑞照,等. 花岗岩类与大陆地壳生长初探——以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例 [J]. 中国地质, 2009, 26(3):594-622.
Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Qiu Ruizhao, et al. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continental crust: Case study of the formation of key orogen granitoids in China [J]. Geology in China, 2009, 26 (3):594-622 (in Chinese with English abstract).
- [10] 董申保,田伟. 花岗岩研究的反思 [J]. 高校地质学报, 2007, 13 (3):353-361.
Dong Shenbao, Tian Wei. Meditation on granite research [J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3):353-361(in Chinese with English abstract).
- [11] 罗照华,黄忠敏,柯珊. 花岗质岩石的基本问题 [J]. 地质论评, 2007, 53(B08):180-226.
Luo Zhaohua, Huang Zhongmin, Ke Shan. An overview of granitoid [J]. Geological Review, 2007, 53 (B08):180-226 (in Chinese with English abstract).
- [12] 吴福元. 花岗岩成因的若干问题 [J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1218-1237.
Wu Fuyuan. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (6):1218-1237 (in Chinese with English abstract).
- [13] Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects [J]. Lithos, 2007, 97:1-29.
- [14] Barbarin B. Enclave and Granite Petrology [C]//Development in Petrology. Amsterdam:Elsevier, 1991:431-444.
- [15] Didier J, Barbarin B. Enclaves and Granite Petrology [J]. Development in Petrology, 13, Amsterdam:Elsevier, 1991, 46:0-625.
- [16] 周珣若. 花岗岩混合作用 [J]. 地学前缘, 1994, 1(1/2):77-97.
Zhou Xunruo. Hybridization in the genesis of granitoids [J]. Earth Science Frontiers, 1994, 1 (1/2):77-97 (in Chinese with English

- abstract).
- [17] 杜杨松, 车勤建, 秦新龙, 等. 花岗质岩石中岩石包体研究的新进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(4):334-337.
Du Yangsong, Che Qinjian, Qin Xinlong, et al. A review of progresses in research of xenoliths in granitoids [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2003, 22(4):334-337(in Chinese with English abstract).
- [18] Didier J. Granites and their enclaves: The bearing of enclaves on the origin of granite [C]. Development in Petrology. Amsterdam: Elsevier, 1973.
- [19] Chappell B W, White A J R. Restgite enclaves and the resite model [C]. Didier J, Barbarin B (eds). Enclaves and Granite Petrology. Amsterdam: Elsevier, 1991:375-381.
- [20] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3):403-414.
Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, et al. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun orogenic belt [J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13 (3):403-414 (in Chinese with English abstract).
- [21] 莫宣学. 青藏高原岩浆岩成因研究: 成果与展望 [J]. 地质通报, 2009, 28(12):1694-1702.
Mo Xuanxue. A review of genesis study on magmatic rocks of the Qinghai-Tibet Plateau: achievements and remaining problems [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(12):1694-1702.
- [22] 王德滋, 谢磊. 岩浆混合作用: 来自岩石包体的证据[J]. 高校地质学报, 2008, 14(1):16-21.
Wang Dezi, Xie Lei. Magma Mingling: Evidence form Enclaves [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14 (1):16-21(in Chinese with English abstract).
- [23] 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 昆仑开合构造[M]. 北京:地质出版社, 1992:58-100.
Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui, et al. Opening-closing Tectonics of Kunlun Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992:58-100 (in Chinese).
- [24] 姜春发, 王宗起, 李锦轶, 等. 中央造山带开合构造[M]. 北京:地质出版社, 2000:1-154.
Jiang Chunfa, Wang Zongqi, Li Jinyi, et al. Opening-closing Tectonics of the Central Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000:1-154(in Chinese).
- [25] 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 等. 青藏高原昆仑晚古生代末—中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. 现代地质, 1998, 12(3):345-352.
Guo Zhengfu, Deng Jinfu, Xu Zhiqing, et al. Late Palaeozoic Mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate acidic igneous rocks from the eastern Kunlun Mountains of Northwestern China [J]. Geoscience, 1998, 12 (3):345-352 (in Chinese with English abstract).
- [26] 罗照华, 邓晋福, 曹永清, 等. 青海省东昆仑地区晚古生代—早中生代火山活动与区域构造演化[J]. 现代地质, 1999, 13(1):51-56.
Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Cao Yongqin, et al. Volcanism and regional tectonic evolution during late Paleozoic-early Mesozoic period in the East-Kunlun, Qinghai Province [J]. Geoscience, 1999, 13(1):51-56(in Chinese with English abstract).
- [27] 罗照华, 柯珊, 曹永清, 等. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J]. 地质通报, 2002, 21(6):292-297.
Luo Zhaohua, Ke Shan, Cao Yongqing, et al. Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun [J]. Geological. Bulletin of China, 2002, 21(6):292-297(in Chinese with English abstract).
- [28] 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录[J]. 地质论评, 2000, 46(2):203-211.
Yuan Wanming, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, et al. Geological records of the regional tectonic environments during the Indo Chinese Period within granites in the East-Kunlun [J]. Geological Reviews, 2000, 46(2):203-211(in Chinese with English abstract).
- [29] 袁万明, 莫宣学, 王世成, 等. 东昆仑金成矿作用与区域构造演化的关系[J]. 地质与勘探, 2003, 39(3):5-8.
Yuan Wanming, Mo Xuanxue, Wang Shicheng, et al. The relationship between gold mineralization and regional tectonic evolution in Eastern Kunlun Mountions [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(3):5-8(in Chinese with English abstract).
- [30] 刘成东. 东昆仑造山带东段花岗岩岩浆混合作用 [M]. 北京:地质出版社, 2008.
Liu Chengdong. Granitoid Magma in Eastern Part of the East Kunlun Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008(in Chinese).
- [31] 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制[J]. 中国地质, 2005, 32(3):386-395.
Chen Hongwei, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, et al. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt [J]. Geology in China, 2005, 32(3):386-395 (in Chinese with English abstract).
- [32] 孙雨, 裴先治, 丁仁平, 等. 东昆仑哈拉尕吐岩浆混合岩: 来自锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 地质学报, 2009, 83(7):1000-1010.
Sun Yu, Pei Xianzhi, Ding Saping, et al. Halagatu magma mixing granite in the East Kunlun Mountains—evidence from zircon U-Pb Dating [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(7):1000-1010 (in Chinese with English abstract).
- [33] 李瑞保. 东昆仑造山带(东段)晚古生代—早中生代造山作用研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
Li Ruibao. Research on the Late Paleozoic-Early Mesozoic Orogeny in East Kunlun Orogen [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012(in Chinese with English abstract).
- [34] 张亚峰, 裴先治, 丁仁平, 等. 东昆仑都兰可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义 [J]. 地质通报, 2010, 29(1):80-85.
Zhang Yafeng, Pei Xianzhi, Ding Saping, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of quartz diorite at the Kekesha area of Dulan

- County, eastern section of the East Kunlun orogenic belt, China and its significance [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(1): 80–85(in Chinese with English abstract).
- [35] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Geostandard and Geoanalytical Research, 2004, 28: 353–370.
- [36] Ludwig K R. Isoplot/Ex, Version 2.49. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1999: 47.
- [37] Anderson T. Correction of common Pb in U–Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59–79.
- [38] 简平, 程裕淇, 刘敦一. 变质锆石成因的岩相学研究—高级变质岩—U–Pb 年龄解释的依据 [J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 183–191. Jian Pin, Cheng Yuqi, Liu Dunyi. Petrographical study of metamorphic zircon: Basic roles in interpretation of U–Pb age of high grade metamorphic rocks [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(3): 183–191(in Chinese with English abstract).
- [39] Rubatto D, Gebauer D. Use of Cathodoluminescence for U–Pb Zircon Dating by IOM Microprobe: Some Examples from the Western Alps [M]. Cathodoluminescence in Geoscience, Springer–Verlag Berlin Heidelberg, Germany. 2000: 373–400.
- [40] Moller A, O'Brien P J, Kennedy A, et al. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: An example from the ultrahigh–temperature granulites of Rogaland (SW Norway) [J]. EMU Notes in Mineralogy, 2003, 5: 65–82.
- [41] 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): 1589–1602. Wu Yuanbao, Zhen Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U–Pb age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589–1602(in Chinese with English abstract).
- [42] Boynton W V. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite studies [C]//Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam Elsevier, 1984: 63–114.
- [43] 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等. 岩石成因, 构造环境与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社, 2004. Deng Jinfu, Luo Zhaohua, Su Shangguo, et al. Petrogenesis, Tectonic Setting and Metallogenesis [M]. Beijing: Geological Press, 2004(in Chinese).
- [44] Wilson M. Igneous Petrogenesis [M]. Unwin Hyman, London, 1989: 1–366.
- [45] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination in of granitoids [J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1989, 01: 635–643.
- [46] Rollinson H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation [J]. Longman Group UK Ltd, New York, 1993: 1–352.
- [47] 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 等. 东昆仑造山带早中生代镁铁质岩墙群 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年、元素和 Sr–Nd–Hf 同位素地球化学 [J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3350–3364. Xiong Fuhao, Ma Changqian, Zhang Jinyang, et al. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating, elements and Sr–Nd–Hf isotope geochemistry of the Early Mesozoic mafic dyke swarms in East Kunlun orogenic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3350–3364(in Chinese with English abstract).
- [48] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Sundares A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. London: Geol Soc Spec Publ 42, 1989: 313–345.
- [49] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. Nature, 1990, 347: 662–665.
- [50] Castillo P R, Janney P E, Solidum R U. Petrology and geochemistry of Camiguin island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting [J]. Contrib. Mineral. Petrol, 1999, 134: 33–51.
- [51] 许继峰, 王强, 徐义刚, 等. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制 [J]. 岩石学报, 2001, 17(04): 576–584. Xu Jifeng, Wang Qiang, Xu Yigang, et al. Geochemistry of Anjishan intermediate–acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 576–584 (in Chinese with English abstract).
- [52] Rudnick R L, Barth M, Horn I et al. Rutile–bearing refractory eclogites: Missing link between continents and depleted mantle [J]. Science, 2000, 287: 278–281.
- [53] Weyer S, Muenker C, Mezger K. Nb/Ta, Zr/Hf and REE in the depleted mantle: Implications for the differentiation history of the crust–mantle system [J]. Earth Planet Sci. Lett., 2003, 205(3): 309–324.
- [54] 赵振华, 熊小林, 王强, 等. 铌与钽的某些地球化学问题 [J]. 地球化学, 2008, 37(4): 304–315. Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Wang Qiang, et al. Some aspects on geochemistry Nb and Ta [J]. Geochimica, 2008, 37(4): 304–315(in Chinese with English abstract).
- [55] Castillo P R. An overview of adakites petrogenesis [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51: 257–268.
- [56] Petford N, Atherton M. Na–rich partial Melts form Newly Underplated Basaltic Crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru [J]. Journal of Petrology, 1996, 37: 1491–1521.
- [57] 朱金初, 张佩华, 谢才富, 等. 桂东北里松花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因 [J]. 地球化学, 2006, 25(5): 506–516. Zhu Jinchu, Zhang Peihua, Xie Caifu, et al. Magma mixing origin of the mafic enclaves in Lisong granite, NE Guangxi, western Nanling Mountains [J]. Geochimica, 2006, 25(5): 506–516(in Chinese with English abstract).
- [58] 覃锋, 徐晓霞, 罗照华. 北京房山岩体形成过程中的岩浆混合作用证据 [J]. 岩石学报, 2006, 022(12): 2957–2970. Qin Feng, Xu Xiaoxia, Luo Zhaohua. Mixing and mingling in petrogenesis of the Fangshan intrusion, Beijing [J]. Acta Petrologica

- Sinica, 2006, 22 (12):2957-2970 (in Chinese with English abstract).
- [59] Wyllie P J, Cox K G, Biggar G M. The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks[J]. *J Petrol*, 1962, 3(2):238-243.
- [60] Pitcher W S. *The Nature and Origin of Granite* [M]. London: Chapman and Hall, 1997.
- [61] 徐夕生, 范钦成, Reilly S Y O, 等. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石定年与成因探讨 [J]. *科学通报*, 2004, 49 (18):1883-1893.
- Xu Xisheng, Fan Qincheng, Reilly O S Y, et al. U-Pb dating of zircons from quartz diorite and its enclaves at Tongguanshan in Anhui and its petrogenetic implication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(18):1883-1893(in Chinese with English abstract).
- [62] 谢磊, 王德滋, 王汝成, 等. 浙江普陀花岗岩杂岩体中的石英闪长质包体:斜长石内部复杂环带研究与岩浆混合史记录[J]. *岩石学报*, 2004, 20(6):1397-1408.
- Xie Lei, Wang Dezi, Wang Rucheng, et al. Complex zoning texture in plagioclases from the quartz diorite enclave in the Putuo granitic complex, Zhejiang Province:record of magma mixing [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(6):1397-1408(in Chinese with English abstract).
- [63] 曹永清, 邓晋福. 东昆仑—柴达木盆地北缘岩浆活动、构造演化、深部过程与成矿 [J]. *现代地质*, 2000:8-9.
- Cao Yongqin, Deng Jinfu. Magmatism, tectonic evolution and deep metallogenesis of East Kunlun-Northern margin of the Qidam Basin [J]. *Geoscience*, 2000:8-9 (in Chinese with English abstract).
- [64] 曹永清, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑—柴达木北缘地区早古生代火山作用与构造演化[J]. *地质论评*, 1999, 45(增刊):1003-1009.
- Cao Yongqin, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, et al. Paleozoic volcanic activities and tectonic evolution of the Eastern Kunlun Mountains—the northern margin of the Qaidam Basin [J]. *Geological Review*, 1999, 45(supp.):1003-1009(in Chinese with English abstract).
- [65] 朱云海. 东昆仑复合造山带蛇绿岩、岩浆岩及构造岩浆演化[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2002, 55-91.
- Zhu Yunhai. Ophiolite, Magmatite and Tectono-Magma Evolution of East Kunlun Compound Orogenic Belt [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002:55-91(in Chinese).
- [66] 朱云海, 朱耀生, 林启祥, 等. 东昆仑造山带海德乌拉一带早侏罗世火山岩特征及其构造意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2003, 28(6):653-659.
- Zhu Yunhai, Zhu Yaosheng, Lin Qixiang, et al. Characteristics of early Jurassic volcanic rocks and their tectonic significance in Haidewula, East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[J]. *Earth Science*, 2003, 28(6):653-659(in Chinese with English abstract).
- [67] 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 等. 东昆仑造山带白日其利辉长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地质通报*, 2011, 30(8):1196-1202.
- Xiong Fuhao, Ma Changqian, Zhang Jinyang, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Bairiqili gabbro pluton in East Kunlun orogenic belt and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30 (8):1196-1202 (in Chinese with English abstract).
- [68] 柴耀楚, 冯秉贵, 杨经绥. 东昆仑中段东西大滩花岗岩带的基本特征及其成因的探讨[J]. *青藏高原地质文集*, 1984, (15):78-90.
- Chai Yaochu, Feng Binggui, Yang Jinsui. On the geological feature and genesis of the granitic zone in the Dong-Xidatan area of Middle-Eastern Kunlun Mountains [J]. *Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau*, 1984, (15):78-90 (in Chinese with English abstract).
- [69] 许荣华, Harris N B W, Lewis C L, 等. 拉萨至格尔木的同位素地球化学[C]//中英青藏高原综合地质考察队. 青藏高原地质演化 [C]. 北京: 科学出版社, 1990:280-302.
- Xu Ronghua, Harris N B W, Lewis C L, et al. Isotope geochemistry of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud [C] //Chinese British Tibet Plateau Geological Expedition. *The Geological Evolution of the Tibetan Plateau*. Beijing: Science Press, 1990:282-302.
- [70] 陈文, 郭彦如, 崔彬, 等. 东昆仑西大滩岩系变质和变形事件的同位素年代学研究[J]. *地质论评*, 2002, 48(S):103-109.
- Chen Wen, Guo Yanru, Cui Bing, et al. Research on the isotopic ages of the deformations and metamorphisms of the Xidatan rock series, East Kunlun Mountains [J]. *Geological Review*, 2002, 48 (S):103-109(in Chinese with English abstract).
- [71] 殷鸿福, 张克信, 朱云海, 等. 中华人民共和国区域地质调查报告:1:250 000 冬给措纳湖幅 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003:60-80.
- Yin Hongfu, Zhang Kexin, Zhu Yunhai, et al. *The People's Republic of China Regional Geological Report, Donggi Conag Hu Map Scale:1:250,000* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2003:60-80(in Chinese).
- [72] 童海奎, 王树林, 宋春生, 等. 青海省查查香卡地区晚三叠世火山岩岩石学及其构造意义[J]. *高原地震*, 2004, 16(2):38-46.
- Tong Haikui, Wang Shulin, Song Chunsheng, et al. Study on volcanic rocks and their structural environment of Later Triassic epoch in Chachaxiangka area in Qinghai Province [J]. *Plateau Earthquake Research*, 2004, 16(2):38-46(in Chinese with English abstract).
- [73] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(5):369-380.
- Yang Jinsui, Xu Zhiqing, Li Haibing, et al. The paleo-Tethyan volcanism and plate tectonic regime in the Anyemaqen region of East Kunlun, Northern Tibet Plateau [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(5):369-380.
- [74] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 造山带高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及升降机制[M]. 北京:地质出版社, 2006.
- Xu Zhiqing, Yang Jinsui, Li Haibing, et al. *Orogenic Plateaux-terrene Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004 (in

- Chinese).
- [75] 陈能松, 孙敏, 王勤燕, 等. 东昆仑造山带昆中带的独居石电子探针化学年龄: 多起构造变质时间记录[J]. 科学通报, 2007, 52(11):1297-1306.
Chen Nengsong, Sun Ming, Wang Qinyan, et al. EMP chemical ages of monazites from central zone of the eastern Kunlun Orogen: Records of multi-tectonometamorphic events [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(11):1297-1306(in Chinese with English abstract).
- [76] 王国灿, 向树元, 王岸, 等. 东昆仑及相邻地区中生代—新生代早期构造过程的热年代学记录 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32(5):606-612.
Wang Guocan, Xiang Shuyuan, Wang An, et al. Thermochronological constraint to the processes of the East Kunlun and adjacent areas in Mesozoic—Early Cenozoic [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(5):606-612(in Chinese with English abstract).
- [77] 裴先治, 刘战庆, 李瑞保, 等. 东昆仑南缘布青山地区得力斯坦蛇绿岩地质特征、形成时代及构造环境研究[C]//2010年全国岩石学与地球动力学研讨会. 2010, 16(3):250-273.
Pei Xianzhi, Liu Zhanqing, Li Ruibao, et al. The geological characteristics, age and tectonic environment studies about Delishitan ophiolites in Buqingshan, South of East Kunlun mountains [C]//National Symposium on Petrology and Geodynamics. 2010, 16(3):250-273(in Chinese with English abstract).
- [78] 李瑞保, 裴先治, 刘战庆, 等. 东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造时间的响应 [J]. 地学前缘, 2012, 19(5):244-254.
Li Ruibao, Pei Xianzhi, Liu Zhanqing, et al. Geological characteristics of Late Palaeozoic—Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5):244-254 (in Chinese with English abstract).
- [79] 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动: 来自锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学证据[J]. 中国地质, 2011, 38(5):1150-1167.
Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Early Paleozoic intermediate-acid magmatic activity in Baiqiqiete area along the Buqingshan tectonic mélange belt on the southern margin of East Kunlun constraints from zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. Geology in China, 2011, 38(5):1150-1167 (in Chinese with English abstract).
- [80] 丁烁, 黄慧, 牛耀龄, 等. 东昆仑高 Nb-Ta 流纹岩的年代学、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(12):3603-3617.
Ding Shuo, Huang Hui, Niu Yaoling, et al. Geochemistry, geochronology and petrogenesis of East Kunlun high Nb-Ta rhyolites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(12):3603-3617(in Chinese with English abstract).
- [81] Bonin B. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review[J]. Lithos, 2004, 78:1-24.
- [82] 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑洪水川地区科科鄂阿龙岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义 [J]. 地质学报, 2013, 87(2):178-196.
Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significance of Cocola E'Along quartz diorites body from Hongshuichuan area in the East Kunlun orogenic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2):178-196(in Chinese with English abstract).
- [83] 骆满生, 张克信, 王国灿, 等. 东昆仑造山带塔妥煤矿羊曲组时代新知[J]. 地层学杂志, 2001, 25(1):24-27.
Luo Mansheng, Zhang Kexin, Wang Guocan, et al. New knowledge about the age of the Yangqu Formation in Tatuo, Eastern Kunlun orogenic belt [J]. Journal of Stratigraphy, 2001, 25(1):24-27(in Chinese with English abstract).
- [84] Xiao W J, Windley B F, Chen H L, et al. Carboniferous-Triassic subduction and accretion in the western Kunlun, China: Implications for the collisional and accretionary tectonics of the northern Tibetan plateau[J]. Geology, 2002, 30:295-298.
- [85] Xiao W J, Windley B F, Liu D Y, et al. Accretionary tectonic of the Western Kunlun Orogen, China: A Paleozoic-Early Mesozoic, Long-lived active continental margin with implications for the growth of Southern Eurasia[J]. J. Geol., 2005, 113: 687-705.
- [86] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1):1-28.
Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 2009, 36(1):1-28(in Chinese with English abstract).
- [87] 张传林, 于海峰, 王爱国, 等. 西昆仑西段三叠纪两类花岗岩年龄测定及其构造意义[J]. 地质学报, 2005, 79(5):646-652.
Zhang Chuanlin, Yu Haifeng, Wang Aiguo, et al. Dating of Triassic granites in the Western Kunlun Mountains and its tectonic significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(5):646-652(in Chinese with English abstract).
- [88] Jiang Y H, Jia R.Y, Liu Z, et al. Origin of Middle Triassic high-K calc-alkaline granitoids and their potassic microgranular enclaves from the western Kunlun orogen, northwest China: A record of the closure of Paleo-Tethys[J]. Lithos, 2013, 156-157:13-30.
- [89] Liao S Y, Jiang Y H, Zhou Q, et al. Geochemistry and geodynamic implications of the Triassic bimodal magmatism from Western Kunlun Orogen, northwest China[J]. International Journal of Earth Sciences, 2012, 101:555-577.

Late Triassic magma mixing in the East Kunlun orogenic belt: A case study of Helegang Xilikete granodiorites

CHEN Guo-chao^{1,4}, PEI Xian-zhi¹, LI Rui-bao¹, LI Zuo-chen¹, PEI Lei²,
LIU Zhan-qing³, CHEN You-xin¹, LIU Cheng-jun¹

(1. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Faculty of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. College of Geosciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 4. Survey and Research Institute, Shaanxi Bureau of Coalfield Geology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In the East Kunlun orogenic belt (EKOB), mafic microgranular enclaves (MME) occur frequently in Late Permian–Triassic granitic rocks. In this paper, the authors took Helegang Xilikete granodiorites in the eastern part of the EKOB as an example to study their host rocks and MME in detail. Characteristics of the host rocks and the MME, such as field occurrence, morphology, texture and structure and mineralogy, together with the geochemistry, show that they were cooled and crystallized in a short time immediately after the intrusion of basaltic magma into intermediate–acidic magma and thus have similar distribution patterns to the host rocks in the REE diagram and trace element spider diagram, such as the enrichment of the LREE and LILE and the depletion of the HREE and HFSE, reflecting a typical feature of magma mixing. The result of LA–ICP–MS zircon geochronology implies that the crystallization age of the MME is about 224.9 ± 4.1 Ma, very close to that of the host rock (225 ± 5 Ma), suggesting a crust–mantle magma mixing event at the stage of post–collision in the EKOB in Late Triassic.

Key words: East Kunlun orogenic belt; Helegang Xilikete granodiorites; mafic microgranular enclaves, magma mixing, LA–ICP–MS zircon U–Pb age, Late Triassic

About the first author: CHEN Guo-chao, male, born in 1979, doctor candidate, majors in structural geology; E-mail: chaoschen@126.com.

About the corresponding author: PEI Xian-zhi, male, born in 1963, professor; E-mail: peixzh@sina.com.