

高永宝, 李侃, 钱兵, 等. 东昆仑卡而却卡铜矿区花岗闪长岩及其暗色微粒包体成因: 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素证据[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 646-662.

Gao Yongbao, Li Kan, Qian Bing, et al. The genesis of granodiorites and dark enclaves from the Kaerqueka deposit in east Kunlun belt: Evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 646-662(in Chinese with English abstract).

东昆仑卡而却卡铜矿区花岗闪长岩及其暗色微粒包体成因: 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素证据

高永宝¹ 李侃¹ 钱兵¹ 李文渊¹ 李东生²

苏生顺² Chenguang Zhang³ 张大民² 王生明²

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 青海省第三地质矿产勘查院, 青海 西宁 810029; 3. Department of Geological Sciences and Geological Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, K7L 3N6, Canada)

摘要: 卡而却卡铜多金属矿区花岗闪长岩体中广泛分布具有似斑状结构的闪长质包体, 包体主要为椭圆形, 定向排列, 具有与寄主岩石相似的矿物组合, 但角闪石含量明显比寄主岩石高, 具有明显的不平衡反应结构, 发育针状磷灰石。LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试表明, 暗色微粒包体形成于(234.1±0.6) Ma, 寄主花岗闪长岩形成于(234.4±0.6) Ma, 为岩浆混合作用的存在提供了有力证据。地球化学特征显示, 暗色包体 SiO₂、MgO 含量较寄主岩石高, 更偏基性; 均富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损高场强元素, 但寄主花岗闪长岩 La_N/Yb_N 值(11.6~19.0)明显高于暗色包体(5.0~9.7), Nb/Ta 值(10.6~11.7)低于暗色包体(11.6~14.8)。二者具有相近的 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 花岗闪长岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -5.3~-4.2, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值为 0.71110~0.71125, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 -5.8~-3.4, $t_{DM}(Hf)$ 为 1012~1102 Ma; 暗色包体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -5.2~-5.0, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值为 0.71114~0.71171, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 -6.3~-1.6, $t_{DM}(Hf)$ 为 937~1129 Ma。综上推测, 在中三叠世俯冲—碰撞转换阶段, EM II 型富集岩石圈地幔在上涌软流圈物质的作用下发生部分熔融产生基性岩浆, 并底侵下地壳物质局部熔融形成长英质岩浆房, 进而由基性岩浆注入长英质岩浆房后, 经过演化形成微粒包体, 演化了基性岩浆与长英质岩浆混合, 最终形成含微粒包体的均一岩浆, 这种岩浆结晶后形成含暗色包体花岗闪长岩。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 岩石地球化学; Sr-Nd-Hf 同位素; 花岗闪长岩; 暗色包体; 卡而却卡铜矿床; 东昆仑
中图分类号: P581; P595; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)03-0646-18

The genesis of granodiorites and dark enclaves from the Kaerqueka deposit in east Kunlun belt: Evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions

收稿日期: 2014-01-27; 改回日期: 2015-02-04

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41102050)、国家“十一·五”科技支撑计划项目(2006BAB01A01)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2013JM5010)、陕西省科学技术研究发展计划项目(2015KJXX-71)、中国地质调查局地质调查项目(1212011121088)、中国地质调查局青年地质英才计划(2013)联合资助。

作者简介: 高永宝, 男, 1982年生, 博士, 助理研究员, 主要从事矿床学及矿床地球化学研究; E-mail: gaoyongbao2006@126.com。

GAO Yong-bao¹, LI Kan¹, QIAN Bing¹, LI Wen-yuan¹, LI Dong-sheng³, SU Sheng-shun²,
Chen-guang Zhang³, ZHANG Da-min², WANG Sheng-ming²

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. No. 3 Geological Prospecting Institute of Qinghai, Xining 810029, Qinghai, China; 3. Department of Geological Sciences and Geological Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, K7L 3N6, Canada)

Abstract: The porphyritoid dioritic enclaves are widely distributed in granodiorites of the Kaerqueka copper deposit, East Kunlun belt. The enclaves are mostly aligned ovals, with similar mineralogy to the host rocks. However, the modal percentage of hornblende is significantly higher than that of the host rock. It has apparent imbalanced structure with development of needle-like apatite. The granodiorite and enclaves have the same age of 234 Ma, which indicates that they might have been formed by magma mixing. As for geochemical characteristics, the enclaves contain higher values of SiO₂ and MgO than the host rock and are hence more mafic. They are also enriched in large LILE and LREE, and are depleted in HFSE. The La_N/Yb_N ratios of host granodiorite (11.6–19.0) are significantly higher than the ratios of the enclaves (5.0–9.7). The Nb/Ta values of host granodiorite (10.6–11.7) are lower than those of the enclaves (11.6–14.8). They have similar Sr, Nd and Hf isotopic compositions. The granodiorite has $\epsilon_{Nd}(t)$ values of -5.3 to -4.2, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i values of 0.71110–0.71125, $\epsilon_{Hf}(t)$ values of -5.8 to -1.6, $t_{DM}(Hf)$ values of 1012–1102 Ma. The enclaves have $\epsilon_{Nd}(t)$ values of -5.2 to -5.0, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i values of 0.71114–0.71171, $\epsilon_{Hf}(t)$ values of -6.3 to -3.4, and $t_{DM}(Hf)$ values of 937–1129 Ma. These data indicate that, at the subduction–collision transition stage of Triassic period, the enriched EMII type lithosphere mantle underwent partial melting and produced mafic magma under the influence of upwelling asthenosphere materials. The partial melting of lower crust materials, which had been underplated by the mantle, formed the felsic magma chamber. The injection of mafic magma into the felsic magma chamber formed enclaves. After mixing of evolved mafic magma with felsic magma, enclaves-bearing homogeneous magma was formed. The crystallization of this homogeneous magma formed granodiorites containing enclaves.

Key words: zircon U–Pb dating; geochemistry; Sr–Nd–Hf isotopes; granodiorite; dark enclave; Kaerqueka copper deposit, East Kunlun belt

About the first author: GAO Yong-bao, male, born in 1982, doctor, assistant researcher, engages in the study of geology and geochemistry of ore deposits; E-mail: gaoyongbao2006@126.com.

1 引言

岩浆岩及其所携带的深源岩石包体作为探测地球深部的“探针”和“窗口”^[1], 蕴含着丰富的壳幔相互作用信息, 对其进行系统的地质和地球化学研究, 可以揭示深部岩浆作用过程, 有助于了解花岗岩起源、演化及形成机制等地质问题^[2–9]。

东昆仑造山带作为青藏高原北部的重要组成部分, 岩浆作用十分强烈^[10–12], 广泛发育多期花岗岩类^[13–14], 存在早—中泥盆世和早—晚三叠世2期重要的幔源岩浆底侵作用和壳幔混合作用^[10, 15–23], 并以暗色微粒包体的广泛发育为主要标志^[10, 15–22], 广泛发育与其相关的金属矿床, 相继发现了虎头崖、维宝、杂林格、四角羊、野马泉、卡尔却卡、克停哈尔、拉陵灶火等矿床^[22, 24–30], 成矿物质具有壳幔混源特征^[22]。本文选择卡而却卡铜多金属矿区暗色微粒包体及其寄主花岗闪长岩进行岩石学、岩石地球化学、LA-

MC-ICP-MS 锆石 U–Pb 年代学及 Sr–Nd–Hf 同位素研究, 探讨暗色包体及其寄主岩石的成因, 并进一步探讨其形成动力学背景, 该研究成果不仅有助于了解东昆仑地区地质演化历史, 而且对于认识该地区多金属矿产成因具有重要意义。

2 地质背景

东昆仑造山带西北部与阿尔金造山带相邻; 北部以昆北断裂带与柴达木陆块相接; 南部以昆南断裂带为界, 与巴颜喀拉—羌塘地块相隔。区内各个时代地层出露较齐全, 从古元古代到第四纪均有出露。其中, 奥陶纪祁漫塔格群(滩间山群)和石炭纪苏组碳酸盐岩与晚古生代—早中生代中酸性侵入岩接触部位常见矽卡岩带, 并有矽卡岩型铁多金属矿产出; 蓟县纪狼牙山组矽卡岩中赋存有层状铅锌矿体。区内岩浆活动频繁, 侵入岩发育广泛, 从元古宙到晚中生代均有发育, 由老到新依次可划

分为前寒武纪(元古宙)、早古生代—晚古生代早期(C-D₃)、晚古生代晚期—早中生代(C₁-T₃)、晚中生代—新生代(J₁-Q) 4个时段,岩性以花岗岩类为主,伴有一定量的闪长岩和少量的辉橄岩、辉长岩等。以早古生代—晚古生代早期、晚古生代晚期—早中生代中酸性侵入岩发育最为广泛^[10, 13],区内大规模的多金属成矿也与这2期中酸性侵入岩关系最为密切。区内构造活动强烈,褶皱构造以NWW向的复式向斜为主,NWW向、NW向和近EW向断裂构成了主体构造骨架,不同级别和序次的断裂构造的交汇聚合部位,往往是成岩成矿的有利部位。

卡而却卡铜多金属矿床位于东昆仑昆中岩浆弧(图1)。矿区出露地层主要为奥陶纪祁漫塔格群(滩间山群),呈不规则孤岛状残留体分布于岩体之中,岩性组合主要为玄武安山岩夹白云岩、大理岩、板岩及千枚岩;矿区侵入岩十分发育,以中酸性侵入岩为主,时代为志留纪和三叠纪,其中志留纪岩浆岩以二长花岗岩为主,形成时代为(426±1) Ma^[22],

仅零星分布;三叠纪岩浆岩主要为似斑状二长花岗岩、花岗闪长岩,似斑状二长花岗岩形成于(227±2) Ma^[30]。A矿区铜矿体产于破碎蚀变带及似斑状黑云母二长花岗岩中;B矿区矿体规模较大,铜钼矿体主要赋存于含暗色包体花岗闪长岩以及似斑状二长花岗岩与祁漫塔格群(滩间山群)的接触带矽卡岩中;C矿区主要为热液(脉)型及矽卡岩型矿化,多赋存于在花岗闪长岩与祁漫塔格群(滩间山群)地层接触部位。矿区构造以断裂为主,褶皱构造不发育。断裂有NWW向和NE向2组,以前者为主。NWW向断裂集中分布于野拉赛以西,挤压强烈,断裂破碎带一般宽50~300 m,长度一般大于10 km,是重要的控矿构造,NE向断裂为张性,切穿NWW向断裂和岩体。

花岗闪长岩体中普遍发育暗色包体,包体形态大多为浑圆状,其次为椭球状、透镜状等,长轴一般为5~40 cm,成群随机分布,局部地段定向排列,具塑性流变特征(图2-a);大多数暗色包体与寄主花岗

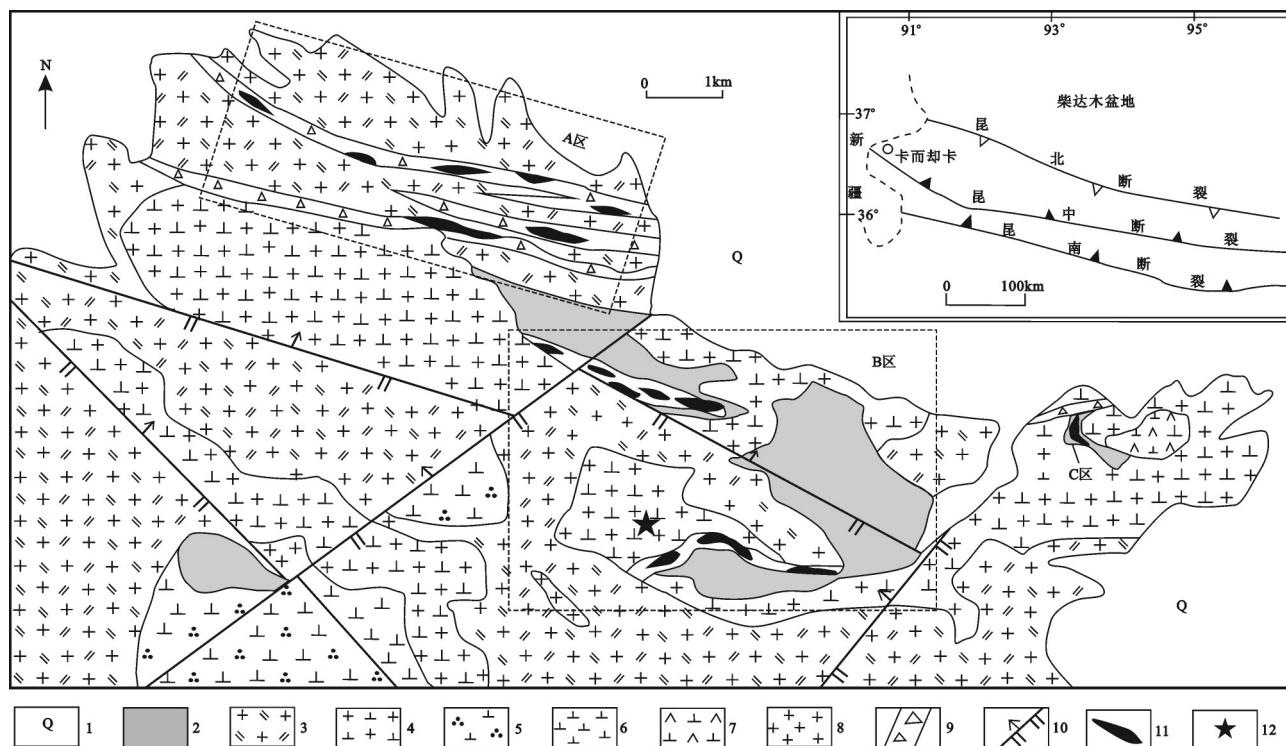


图1 东昆仑卡而却卡铜多金属矿床地质简图(据文献[30]修改)

1—第四系; 2—祁漫塔格群(滩间山群); 3—似斑状二长花岗岩; 4—含暗色包体花岗闪长岩; 5—石英闪长岩; 6—闪长岩; 7—闪长玢岩; 8—花岗岩; 9—破碎蚀变带; 10—断层; 11—矿体; 12—测年龄样品采样位置

Fig.1 Geological map of the Kaerqueka deposit (after reference [30])

1—Quaternary; 2—Qimantag or Tanjianshan Group; 3—Porphyrioid monzogranite; 4—Granodiorite containing enclaves; 5—Quartz diorite; 6—Diorite; 7—Dorite—porphyrite; 8—Granite; 9—Altered fracture zone; 10—Fault; 11—Orebody; 12—Location of dating sample



图2 卡而却卡矿区花岗闪长岩及暗色包体野外及镜下照片

a—花岗闪长岩中的浑圆状、透镜状暗色包体; b—暗色包体与寄主花岗闪长岩界线截然, 包体中发育斜长石斑晶; c—花岗闪长岩由斜长石、角闪石、黑云母、石英组成; d—花岗闪长岩中环带状斜长石; e—暗色包体的似斑状结构, 斜长石斑晶中包裹有大量早期快速结晶的暗色微粒矿物; f—暗色包体中的角闪石斑晶, 边部被熔蚀; Pl—斜长石; Hbl—角闪石; Bt—黑云母; Qz—石英

Fig.2 Photographs of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit

a—Round and lentoid inclusions in the granodiorite; b—Clear distinction between granodiorite and enclaves; c—Granodiorite consisting of plagioclase, hornblende, biotite and quartz; d—Banded plagioclase in granodiorite; e—Early crystalline dark minerals in plagioclase phenocryst of the enclaves; f— Corroded hornblende phenocryst in the enclaves; Pl—Plagioclase; Hbl—Hornblende; Bt—Biotite; Qz—Quartz

闪长岩的界线是截然的(图2-b)。

3 样品及分析方法

3.1 样品采集及岩石学特征

本文研究的岩浆岩样品采自于卡而却卡矿床B矿区含暗色包体花岗闪长岩(KE11-39、KE11-40、KE11-41、KE11-42)。其中,用于锆石测年的含暗色包体花岗闪长岩及其暗色包体为同一样品(KE11-41),采自N 36°48'06.6", E 90°58'33.3"(图1)。

花岗闪长岩呈灰白色,半自形粒状结构,块状构造,主要矿物为斜长石(60%~65%)、石英(15%~20%)、黑云母(6%~8%)和角闪石(5%~7%)等(图2-c)。斜长石呈半自形板柱状,双晶普遍发育,环带结构发育(图2-d),多为中长石;石英呈不规则粒状;角闪石呈粒状,属普通角闪石;黑云母为片状。副矿物主要为磷灰石及少量磁铁矿。

暗色包体呈暗灰色,似斑状结构,典型的岩浆结构。斑晶含量为25%~35%,主要包括斜长石和角闪石。斜长石呈板状,环带结构发育,并包裹有大量早期快速结晶的暗色微粒矿物(图2-e);角闪石呈粒状,多被熔蚀(图2-f)。基质具细粒结构(图2-e、f),主要由斜长石(35%~40%)、普通角闪石(20%~25%)、黑云母(10%~15%)及少量石英(2%)组成,副矿物主要为针状磷灰石。

3.2 测试分析方法

主量元素、微量元素分析在西安地质矿产研究所实验测试中心完成,其中主量元素采用X荧光光谱(XRF)进行分析,分析精度优于1%;稀土和微量元素利用SX-2型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行测定,分析精度优于5%~10%。

锆石的CL图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室电子探针仪加载的阴极发光仪上完成。LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所MC-ICP-MS实验室完成,定年分析仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的Newwave UP 213激光剥蚀系统。激光剥蚀所用斑束直径为25 μm,以He为载气。对锆石标准的定年精度和准确度在1%(2σ)左右,锆石U-Pb定年以锆石GJ-1为外标,U、Th含量以锆石M127(U: 923×10⁻⁶; Th: 439×10⁻⁶; Th/U: 0.475)^[31]为外标进行校正。测试过程中在每测定5~7个样品前后

重复测定2个锆石GJ1对样品进行校正,并测量一个锆石Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用ICPMSDataCal程序^[32],锆石年龄谐和图用Isoplot 3.0程序获得。详细实验测试过程可参见侯可军等^[33]。样品分析过程中,Plesovice标样作为未知样品的分析结果为(337.2±2.0) Ma (n=12, 2σ),对应的年龄推荐值为(337.13±0.37) Ma (2σ)^[31],两者在误差范围内完全一致。

Sr-Nd同位素测试在天津地质矿产研究所完成。Sr-Nd同位素分析由Triton热电离子质谱仪(TIMMS)测定。Sr、Nd的全流程空白分别为20 pg、10 pg,对样品的影响可以忽略。测试时¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd比值校准到¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721906和¹⁴⁵Nd/¹⁴⁴Nd=0.348440,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值标准化到⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.11940。该仪器测量JMC Nd标样的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd比值为0.511132±5,测量NBS 987标准的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710253±6。国际标准岩石样BCR-2的结果是¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512632±5。

锆石Hf同位素测试是在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室Neptune多接收等离子质谱和Newwave UP213紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行的,实验过程中采用He作为剥蚀物质载气,剥蚀直径采用55 μm,测定时使用锆石国际标样GJ-1作为参考物质,分析点与U-Pb定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等^[34]。分析过程中锆石标准GJ1的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf测试加权平均值为0.281993±15 (2SD, n=21),与文献报道值^[34-35]在误差范围内完全一致。

4 分析结果

4.1 锆石U-Pb年代学

暗色微粒包体(KE11-41-1)锆石Th/U比值为0.7~1.2,平均1.0,以短柱状自行晶为主,具明显的震荡环带结构(图3),属岩浆结晶锆石。进行普通铅校正后的23个点均为有效数据(表1),²⁰⁶Pb/²³⁸U表观年龄为(232.2±1.1) Ma~(238.5±1.1) Ma,加权平均年龄为(234.1±0.6) Ma (MSWD=1.07)(图4),分析数据均分布于谐和线附近,因此分析的锆石年龄代表了暗色包体的形成年龄。

寄主花岗闪长岩(KE11-41-2)锆石以短柱及长



图3 卡而却卡矿区花岗闪长岩及暗色包体锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of zircons of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit (circles are the positions of laser spots)

柱状晶形为主, 自形晶, 具明显的震荡环带结构(图3), Th/U比值为0.6~1.2, 平均0.9, 具有岩浆结晶锆石的特征。进行普通铅校正后的20个点均为有效数据(表1), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄为(231.3±1.4) Ma~(237.6±1.5) Ma, 加权平均年龄为(234.4±0.6) Ma (MSWD=0.91)(图4), 分析数据位于谐和线上或附近, 因此分析的锆石年龄代表了花岗闪长岩的形成年龄。

4.2 主量及微量元素

选取卡而却卡矿床B矿区花岗闪长岩(3件)及其暗色包体(3件)样品进行了主量及微量元素分析, 结果见表2。

寄主花岗闪长岩 SiO_2 含量为 63.8%~65.0%, MgO 含量为 2.03%~2.80%, K_2O 含量为 2.57%~3.07%, CaO 含量为 4.57%~4.92%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为 6.08%~6.33%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 1.06~1.38, A/CNK 值为 1.00~1.04。暗色包体 SiO_2 含量为 52.9%~59.9%, MgO 含量为 3.24%~4.31%, 较寄主花岗岩更为基性; K_2O 含量为 1.96%~2.32%, CaO 含量为 6.03%~6.73%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为 5.73%~6.41%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 1.73~2.05, A/CNK 值为 1.01~1.03。花岗闪长岩及其暗色包体均属准铝质花岗岩(图5-a), 总

体属高钾钙碱性系列(图5-b)。在 Harker 图解(图6)中, 寄主岩石与暗色包体主量元素具有良好的线性关系, 随着 SiO_2 的增加, Al_2O_3 、 CaO 、 P_2O_5 、 MgO 、 MnO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 TFeO 呈线性递减, 而 K_2O 有明显的增加, 反映其经历了斜长石、磷灰石的分离结晶作用^[36]。

寄主花岗闪长岩与暗色包体 ΣREE 基本相当, 分别为 115.2×10^{-6} ~ 201.9×10^{-6} 和 126.3×10^{-6} ~ 191.2×10^{-6} 。Eu 异常无明显差异, 寄主花岗闪长岩 δEu 为 0.71~0.83, 暗色包体 δEu 为 0.57~0.71, 可能曾经有斜长石和角闪石的分离结晶。均为轻稀土富集型, 但寄主花岗闪长岩 La_N/Yb_N 为 11.6~19.0, 明显高于暗色包体(La_N/Yb_N 为 5.0~9.7)。暗色包体及寄主花岗闪长岩配分曲线比较接近, 均略向右倾(图7-a), 但重稀土分配模式较为平坦。

寄主花岗闪长岩及暗色包体微量元素相似, 富集 Rb、K 等大离子亲石元素, 明显亏损高场强元素(P、Nb、Ta、Ti 等)和过渡元素(Sr、Ba 等)(图7-b)。寄主花岗闪长岩 Rb/Sr 为 0.23~0.40, Nb/Ta 为 10.6~11.7; 暗色包体 Rb/Sr 为 0.30~0.57, Nb/Ta 为 11.6~14.8。

4.3 Sr-Nd 同位素特征

暗色包体及其寄主花岗岩的 Sr-Nd 同位素组

表1 卡而却卡矿区长岩闪长岩及暗色包体锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测试结果
 Table 1 LA-MC-ICP-MS U-Pb data of zircon of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit

测试点	$^{232}\text{Th}/10^6$	$^{238}\text{U}/10^6$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1 δ	比值	1 δ	比值	1 δ	年龄/Ma	1 δ	年龄/Ma	1 δ	年龄/Ma	1 δ
暗色微粒包体 (KE11-41-1)															
KE11-41-1-1	183	162	1.1	0.05208	0.00087	0.26544	0.00461	0.03698	0.00028	300.1	38.9	239.0	3.7	234.1	1.8
KE11-41-1-2	167	192	0.9	0.05120	0.00049	0.26224	0.00374	0.03719	0.00045	250.1	22.2	236.5	3.0	235.4	2.8
KE11-41-1-3	116	159	0.7	0.05294	0.00044	0.26993	0.00271	0.03702	0.00027	327.8	20.4	242.6	2.2	234.4	1.7
KE11-41-1-4	177	164	1.1	0.05143	0.00038	0.26253	0.00267	0.03705	0.00030	261.2	16.7	236.7	2.1	234.5	1.9
KE11-41-1-5	183	195	0.9	0.05205	0.00038	0.26824	0.00247	0.03738	0.00023	287.1	-13.9	241.3	2.0	236.6	1.4
KE11-41-1-6	196	195	1.0	0.05191	0.00050	0.26242	0.00255	0.03668	0.00017	283.4	20.4	236.6	2.1	232.2	1.1
KE11-41-1-7	160	170	0.9	0.05214	0.00046	0.26484	0.00228	0.03688	0.00016	300.1	25.0	238.6	1.8	233.4	1.0
KE11-41-1-8	188	182	1.0	0.05110	0.00049	0.26553	0.00261	0.03770	0.00019	255.6	50.0	239.1	2.1	238.5	1.1
KE11-41-1-9	188	200	0.9	0.05253	0.00044	0.26649	0.00226	0.03682	0.00017	309.3	13.9	239.9	1.8	233.1	1.1
KE11-41-1-10	68	87	0.8	0.05325	0.00067	0.27049	0.00353	0.03686	0.00020	338.9	29.6	243.1	2.8	233.3	1.3
KE11-41-1-11	137	186	0.7	0.05262	0.00040	0.26779	0.00210	0.03692	0.00015	322.3	18.5	240.9	1.7	233.7	0.9
KE11-41-1-12	82	103	0.8	0.05253	0.00051	0.26654	0.00307	0.03682	0.00028	309.3	22.2	239.9	2.5	233.1	1.7
KE11-41-1-13	128	123	1.0	0.05303	0.00046	0.26983	0.00287	0.03692	0.00027	331.5	20.4	242.6	2.3	233.7	1.7
KE11-41-1-14	176	146	1.2	0.05221	0.00039	0.26821	0.00291	0.03727	0.00032	294.5	23.1	241.3	2.3	235.9	2.0
KE11-41-1-15	118	109	1.1	0.05567	0.00327	0.28972	0.01803	0.03763	0.00022	438.9	131.5	258.3	14.2	238.1	1.4
KE11-41-1-16	162	133	1.2	0.05346	0.00043	0.27188	0.00307	0.03692	0.00033	350.1	16.7	244.2	2.4	233.7	2.0
KE11-41-1-17	183	155	1.2	0.05223	0.00038	0.26923	0.00324	0.03738	0.00036	294.5	21.3	242.1	2.6	236.6	2.2
KE11-41-1-18	131	168	0.8	0.05261	0.00083	0.26711	0.00409	0.03687	0.00017	322.3	35.2	240.4	3.3	233.4	1.1
KE11-41-1-19	209	179	1.2	0.05237	0.00094	0.26683	0.00525	0.03693	0.00014	301.9	40.7	240.2	4.2	233.8	0.9
KE11-41-1-20	65	81	0.8	0.05374	0.00341	0.27808	0.02168	0.03709	0.00049	361.2	144.4	249.1	17.2	234.8	3.0
KE11-41-1-21	640	675	0.9	0.05229	0.00060	0.26664	0.00684	0.03697	0.00080	298.2	25.9	240.0	5.5	234.0	5.0

续表 I

测试点	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1 δ	比值	1 δ	比值	1 δ	比值	1 δ	年龄/Ma	1 δ	年龄/Ma	1 δ
KEI1-41-1-22	222	239	0.9	0.05361	0.00063	0.27694	0.00492	0.03757	0.00058	353.8	30.6	248.2	3.9	237.7	3.6
KEI1-41-1-23	76	78	1.0	0.05633	0.00216	0.29156	0.01438	0.03730	0.00028	464.9	80.5	259.8	11.3	236.1	1.7
花岗闪长岩 (KEI1-41-2)															
KEI1-41-2-1	88	88	1.0	0.05269	0.00101	0.26538	0.00529	0.03653	0.00023	322.3	47.2	239.0	4.2	231.3	1.4
KEI1-41-2-2	125	122	1.0	0.05339	0.00048	0.27252	0.00246	0.03704	0.00016	346.4	20.4	244.7	2.0	234.5	1.0
KEI1-41-2-3	92	96	1.0	0.05268	0.00092	0.26672	0.00487	0.03670	0.00018	322.3	38.9	240.1	3.9	232.4	1.1
KEI1-41-2-4	72	86	0.8	0.05366	0.00067	0.27433	0.00368	0.03707	0.00016	366.7	27.8	246.1	2.9	234.6	1.0
KEI1-41-2-5	211	248	0.9	0.05496	0.00042	0.28125	0.00214	0.03715	0.00017	409.3	16.7	251.6	1.7	235.1	1.1
KEI1-41-2-6	70	88	0.8	0.05388	0.00101	0.27681	0.00627	0.03721	0.00032	364.9	42.6	248.1	5.0	235.5	2.0
KEI1-41-2-7	108	97	1.1	0.05324	0.00081	0.27527	0.00406	0.03755	0.00024	338.9	33.3	246.9	3.2	237.6	1.5
KEI1-41-2-8	68	90	0.8	0.05326	0.00059	0.27200	0.00313	0.03707	0.00020	338.9	21.3	244.3	2.5	234.7	1.2
KEI1-41-2-9	142	134	1.1	0.05340	0.00042	0.27239	0.00219	0.03704	0.00017	346.4	18.5	244.6	1.8	234.4	1.0
KEI1-41-2-10	71	100	0.7	0.05377	0.00064	0.27576	0.00344	0.03722	0.00024	361.2	21.3	247.3	2.7	235.6	1.5
KEI1-41-2-11	54	76	0.7	0.05445	0.00089	0.27899	0.00419	0.03725	0.00022	390.8	39.8	249.9	3.3	235.8	1.4
KEI1-41-2-12	110	119	0.9	0.05365	0.00058	0.27440	0.00326	0.03711	0.00021	366.7	28.7	246.2	2.6	234.9	1.3
KEI1-41-2-13	110	96	1.1	0.05324	0.00062	0.26979	0.00310	0.03681	0.00018	338.9	21.3	242.5	2.5	233.0	1.1
KEI1-41-2-14	109	101	1.1	0.05236	0.00122	0.26826	0.00673	0.03716	0.00038	301.9	49.1	241.3	5.4	235.2	2.4
KEI1-41-2-15	135	114	1.2	0.05457	0.00050	0.27873	0.00273	0.03706	0.00017	394.5	22.2	249.6	2.2	234.6	1.1
KEI1-41-2-16	159	156	1.0	0.05300	0.00068	0.27015	0.00406	0.03697	0.00028	327.8	34.3	242.8	3.2	234.0	1.7
KEI1-41-2-17	93	149	0.6	0.05183	0.00039	0.26431	0.00319	0.03694	0.00033	279.7	16.7	238.1	2.6	233.8	2.1
KEI1-41-2-18	66	81	0.8	0.05206	0.00067	0.26461	0.00417	0.03687	0.00034	287.1	29.6	238.4	3.4	233.4	2.1
KEI1-41-2-19	45	68	0.7	0.05359	0.00138	0.27361	0.00737	0.03703	0.00030	353.8	59.3	245.6	5.9	234.4	1.9
KEI1-41-2-20	73	113	0.7	0.05365	0.00084	0.27452	0.00445	0.03713	0.00026	366.7	35.2	246.3	3.5	235.0	1.6

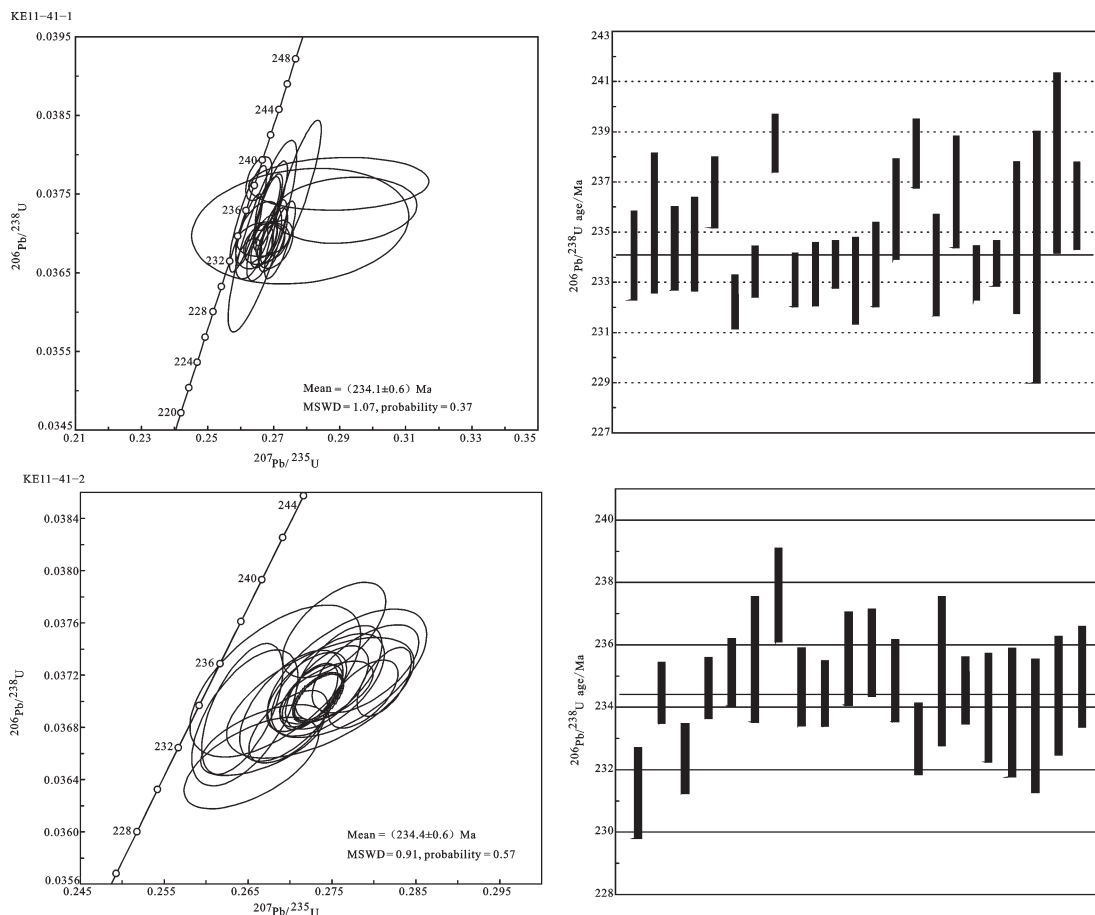


图4 卡而却卡矿区花岗闪长岩及暗色包体U-Pb谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谱图

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age spectra of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit

成如表3所示。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 ϵ_{Nd} 值根据锆石U-Pb年龄计算,暗色包体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-5.2\sim-5.0$, $t_{\text{DM}}(\text{Nd})$ 为1.41~1.62 Ga, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为0.71114~0.71171;花岗闪长岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-5.3\sim-4.2$, $t_{\text{DM}}(\text{Nd})$ 为1.25~1.33 Ga, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为0.71110~0.71125。从图8可以看出,花岗闪长岩、暗色包体Sr-Nd同位素组成基本一致。

4.4 锆石Hf同位素特征

在紧邻锆石年龄分析点的部位(图3)又进行了Hf同位素测试,分析结果见表4、图9。暗色包体的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为0.282449~0.282586,平均0.282513;按照 $t=234$ Ma计算, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-6.3\sim-1.6$,平均为 -4.1 , $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 为937~1129 Ma,平均为1037 Ma。花岗闪长岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为0.282466~0.282532,平均0.282507;按照 $t=234$ Ma计算, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-5.8\sim-3.4$,平均为 -4.3 , $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 为1012~1102 Ma,平均为1046 Ma。

5 讨论

5.1 岩浆混合成因

岩浆的混合具有多种方式,仅通过寄主岩石的研究难以鉴别^[42]。而包体的研究有可能提供直接的证据^[43-45]。

卡而却卡矿区暗色微粒包体具有典型的岩浆结构,多呈椭圆状或透镜状塑变形态特征。LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb测年结果表明,卡而却卡矿区寄主花岗闪长岩和暗色包体锆石U-Pb年龄是一致的,均为234 Ma,排除了暗色包体来源于深部固体变质岩石熔融残留体或浅部围岩捕虏体的可能性;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,为岩浆混合作用的存在提供了有力证据。岩相学研究表明,卡而却卡矿区暗色包体粒度较细,含斜长石、角闪石斑晶,可见斜长石斑晶

表2 卡而却卡矿区花岗闪长岩及其暗色包体主量(%)及微量元素(10^{-6})组成

Table 2 Compositions of major elements and rare elements of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit

分析项目	暗色微粒包体			花岗闪长岩			分析项目	暗色微粒包体			花岗闪长岩		
	KE11-39-1	KE11-40-1	KE11-41-1	KE11-39-2	KE11-40-2	KE11-41-2		KE11-39-1	KE11-40-1	KE11-41-1	KE11-39-2	KE11-40-2	KE11-41-2
SiO ₂	59.9	52.9	54.6	63.8	64.0	65.0	Tm	0.35	0.48	0.38	0.27	0.29	0.23
Al ₂ O ₃	16.9	18.6	18.2	15.6	15.6	16.1	Yb	2.26	3.42	2.72	1.72	1.90	1.48
Fe ₂ O ₃	1.72	2.08	2.17	1.29	1.46	1.33	Lu	0.36	0.55	0.40	0.26	0.31	0.23
FeO	4.26	5.73	5.61	3.36	3.38	2.75	Y	23.1	32.2	26.2	16.4	18.7	15.2
CaO	6.03	6.73	6.18	4.92	4.57	4.80	ΣREE	126.3	161.6	191.2	130.5	201.9	115.2
MgO	3.24	4.31	4.05	2.80	2.50	2.03	La _N /Yb _N	6.8	5.0	9.7	11.6	19.0	12.2
K ₂ O	1.96	2.10	2.32	2.77	3.07	2.57	δEu	0.71	0.57	0.61	0.75	0.71	0.83
Na ₂ O	3.77	4.31	4.02	3.31	3.26	3.54	δCe	1.01	1.07	1.02	1.00	0.95	0.95
TiO ₂	0.78	1.12	1.12	0.64	0.71	0.59	Rb	99.0	171	164	122	129	71.0
P ₂ O ₅	0.19	0.27	0.28	0.15	0.17	0.14	Ba	324	352	324	501	534	395
MnO	0.12	0.16	0.14	0.08	0.07	0.07	Th	6.17	5.04	9.14	13.00	24.20	8.71
灼减量	1.20	1.70	1.24	1.32	1.19	1.16	U	1.50	1.13	1.46	1.58	1.82	1.09
总量	100	100	100	100	100	100	Ta	0.83	1.13	0.80	0.76	0.85	0.73
A/CNK	1.02	1.01	1.03	1.00	1.00	1.04	Nb	9.66	13.60	11.80	8.62	9.95	7.76
K ₂ O+Na ₂ O	5.73	6.41	6.34	6.08	6.33	6.11	Sr	330	300	323	332	322	315
Na ₂ O/K ₂ O	1.92	2.05	1.73	1.19	1.06	1.38	Zr	123	128	164	180	153	134
La	21.4	23.9	36.9	27.8	50.4	25.2	Hf	3.07	3.00	3.76	4.36	3.47	3.21
Ce	49.7	63.1	81.3	56.3	91.3	48.2	Cu	10.4	13.1	9.82	9.40	9.88	15.5
Pr	6.63	8.71	9.93	6.34	9.72	5.63	Pb	14.3	12.4	13.2	21.6	15.2	13.0
Nd	26.3	35.4	36.5	23.0	31.3	21.0	Zn	75.4	101	48.4	62.6	52.4	94.7
Sm	5.29	7.54	7.00	4.32	4.99	3.73	Cr	26.0	21.0	12.1	40.2	18.2	16.8
Eu	1.19	1.34	1.31	1.00	1.10	0.97	Ni	13.6	17.3	8.84	17.2	11.5	13.2
Gd	4.84	6.53	5.86	3.68	4.25	3.27	Cs	3.07	8.62	3.02	2.89	4.37	5.73
Tb	0.67	0.91	0.82	0.49	0.58	0.47	Sc	13.0	14.9	7.99	11.0	10.9	14.8
Dy	4.36	5.89	5.03	3.20	3.36	2.94	Rb/Sr	0.30	0.57	0.51	0.37	0.40	0.23
Ho	0.85	1.06	0.91	0.60	0.66	0.58	Nb/Ta	11.6	12.0	14.8	11.3	11.7	10.6
Er	2.07	2.79	2.17	1.52	1.73	1.29							

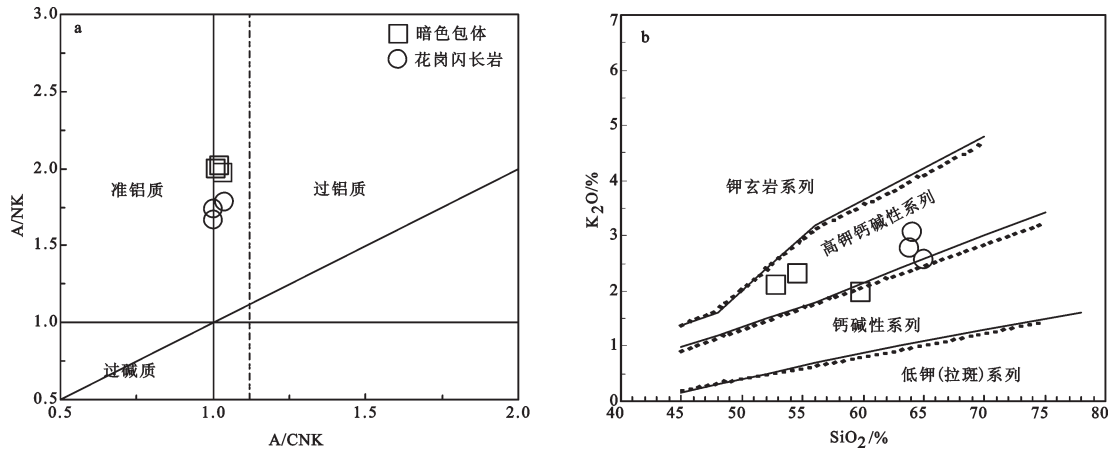


图5 卡而却卡矿区花岗闪长岩及其暗色包体 A/NK-A/CNK 图解(a)及 K₂O-SiO₂图解(b)

Fig. 5 Diagrams of A/NK-A/CNK (a) and K₂O-SiO₂ (b) of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit

包裹有大量早期快速结晶的暗色微粒矿物,角闪石斑晶多被熔蚀,发育针状磷灰石,也表现出岩浆混合作用的特征^[46]。

暗色包体较寄主花岗闪长岩更为基性;在 Harker 图解(图6)中,寄主花岗闪长岩与暗色包体主量元素具有良好的线性关系,随着 SiO₂ 的增加, Al₂O₃、CaO、P₂O₅、MgO、MnO、Na₂O、TiO₂、TFeO 呈线

性递减,而 K₂O 有明显的增加,呈现出典型的岩浆混合或结晶分异演化趋势^[47]。在 TFeO-MgO 演化图解(图10)中,花岗闪长岩及其暗色包体沿岩浆混合趋势线分布,也反映出包体的岩浆混合成因特征^[48]。

在微量元素方面,暗色包体和寄主花岗闪长岩的蛛网图、稀土配分图都很相似(图7),表明微量元素上发生过交换,大离子亲石元素和轻稀土在混合

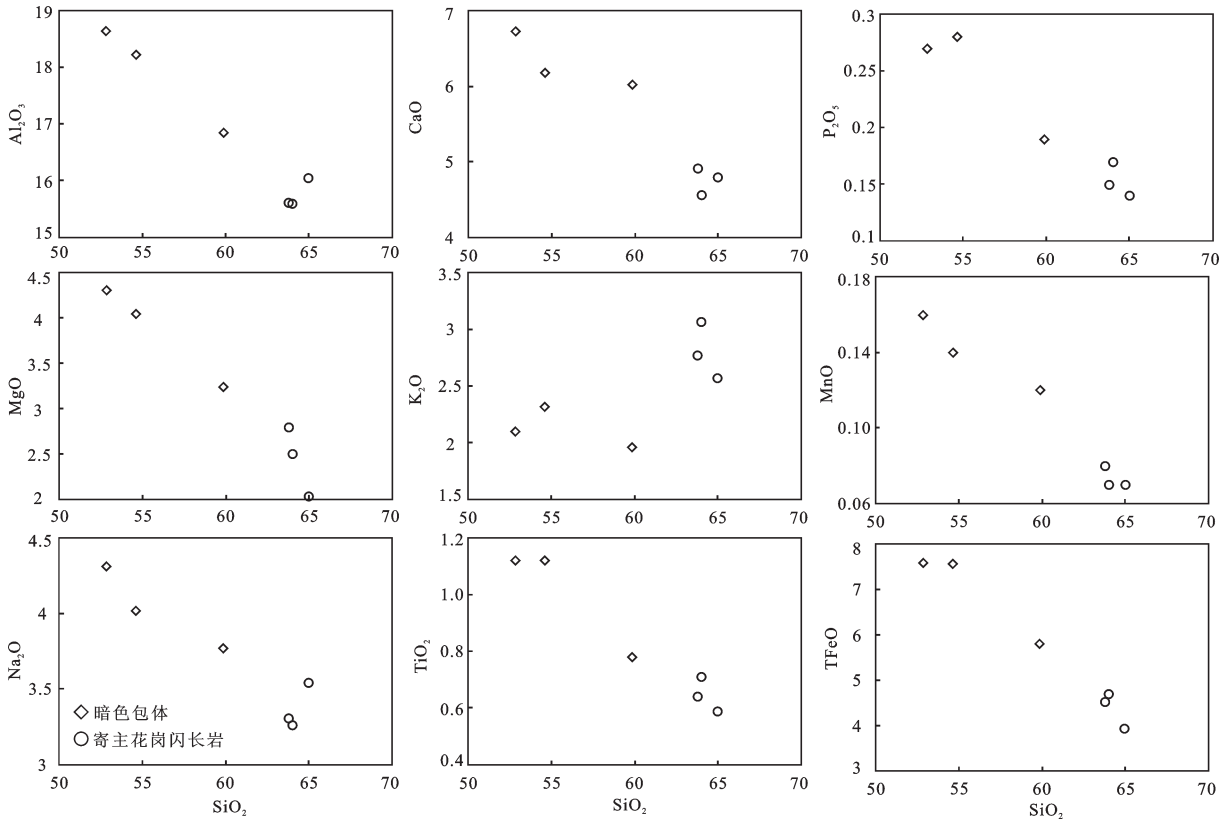


图6 卡而却卡矿区花岗闪长岩及其暗色包体 Harker 图解
 Fig. 6 Harker diagrams of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit

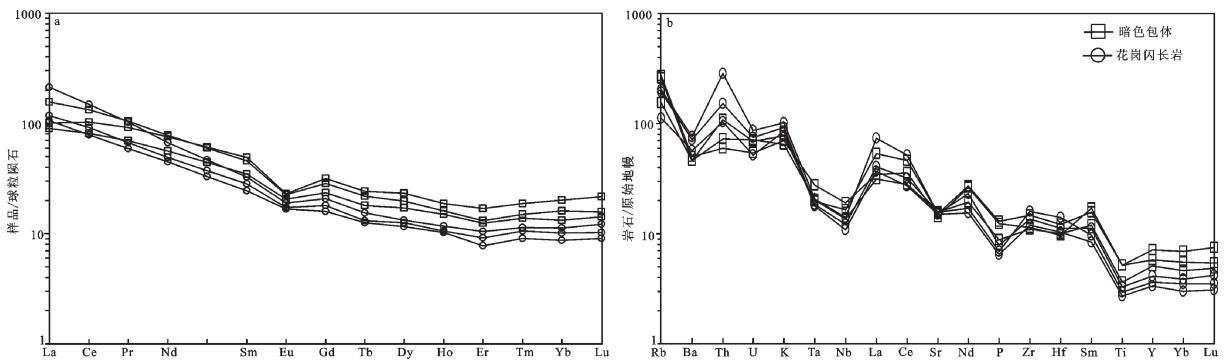


图7 卡而却卡矿区花岗闪长岩及其暗色包体稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化配分模式图(b)(标准化数据据文献[37])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit (after reference [37])

过程中扩散较明显,它们在包体和寄主岩石中含量趋于相似。Sr-Nd-Hf同位素也趋于相近,暗色包体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $-5.2 \sim -5.0$, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值为 $0.71114 \sim 0.71171$, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 $-6.3 \sim -1.6$; 花岗闪长岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $-5.3 \sim -4.2$, $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值为 $0.71110 \sim 0.71125$, $\epsilon_{Hf}(t)$

为 $-5.8 \sim -3.4$, 反映了2种岩浆混合成分交换后均一化现象。

但是,寄主花岗闪长岩 Nb/Ta 为 $10.6 \sim 11.7$, 与花岗岩的 $(Nb/Ta=12)$ 基本一致; 暗色包体 Nb/Ta 为 $11.6 \sim 14.8$, 为花岗岩与玄武质岩石 $(Nb/Ta=17)$ 过渡

表3 卡而却卡矿区花岗闪长岩及其暗色包体 Sr-Nd 同位素组成
Table 3 Sr and Nd isotopic data of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit

同位素 特征参数	暗色包体			花岗闪长岩		
	KE11-40-1	KE11-41-1	KE11-42-1	KE11-40-1	KE11-41-2	KE11-42-2
$(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_m$	1.2317	1.0045	1.4988	0.9711	0.6104	1.0113
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_m$	0.715269	0.714487	0.716698	0.714335	0.713284	0.714488
2σ	0.000006	0.000004	0.000005	0.000009	0.000005	0.000004
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.71117	0.71114	0.71171	0.71110	0.71125	0.71112
$(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m$	0.1312	0.1171	0.1234	0.1082	0.1078	0.1094
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m$	0.512271	0.512252	0.512268	0.512286	0.512231	0.512237
2σ	0.000002	0.000002	0.000002	0.000007	0.000005	0.000002
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-5.2	-5.2	-5.0	-4.2	-5.3	-5.2
t_{DM}/Ga	1.62	1.41	1.49	1.25	1.32	1.33

注: m 为测量值; 计算参数: $\lambda_{\text{S}}=1.42 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$; $\lambda_{\text{Nd}}=0.654 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}}=0.7045$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$; 地球年龄 $t=4560 \text{ Ma}$; $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.21590$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.51313$ ^[38]; 计算采用年龄 234 Ma 。

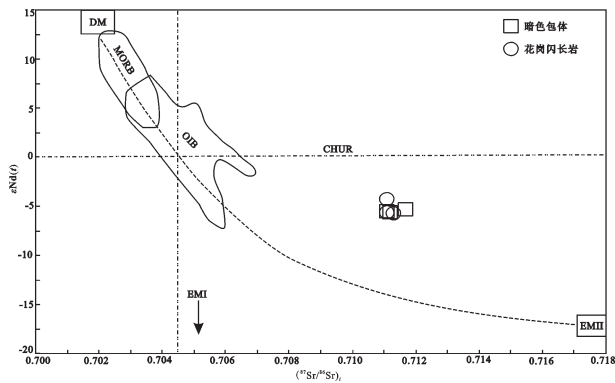


图8 卡而却卡矿区花岗闪长岩及其暗色包体 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解

Fig.8 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit

区域, 表明其分别起源于不同的源区, 暗色包体的岩浆可能起源于地幔的玄武质岩浆, 而寄主花岗闪长岩的岩浆可能为以壳源为主的酸性岩浆。寄主花岗闪长岩 Rb/Sr 为 0.23~0.40, 暗色包体 Rb/Sr 为 0.30~0.57, 均小于 0.5, 具有壳幔混源特征。而东昆仑地区, 基底岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-9.0 \sim -12.8$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 $0.71096 \sim 0.75001$ ^[49]; 起源于富集地幔(EM II 型)的三叠纪镁铁质岩墙群($251 \pm 2 \text{ Ma}$), 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-7.4 \sim -3.6$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 $0.71103 \sim 0.71502$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-2.3 \sim -1.1$ ^[50]; 卡而却卡矿区暗色包体及寄主花岗闪长岩的 Sr-Nd 同位素显示, 其位于地壳和 EM II 型富集地幔之间(图 8), 暗色包体 Hf 同位素接近于

同期镁铁质岩墙群, 而寄主花岗闪长岩的 Hf 同位素位于 EM II 型富集地幔与地壳之间, 均可见其具有壳幔混源特征。卡而却卡矿区暗色包体 $t_{\text{DM}}(\text{Nd})$ 为 1.41~1.62 Ga, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 为 937~1129 Ma; 寄主花岗闪长岩 $t_{\text{DM}}(\text{Nd})$ 为 1.25~1.33 Ga, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 为 1012~1102 Ma, 均远远超过其形成年龄, 表明有古老陆壳物质的重熔。

综上所述, 卡而却卡矿区含暗色包体花岗闪长岩为岩浆混合成因, 起源于富集地幔(EM II)的基性岩浆与起源于古老陆壳重熔的长英质岩浆发生过混合, 并进行过热力学和成分上的交换。

5.2 成岩动力学背景

东昆仑造山带是一个多期叠加的多旋回造山带^[51-52], 前人根据沉积构造、火成岩构造组合等方面证据, 认为东昆仑造山带晚古生代—早中生代为一个完整的造山旋回^[10, 14]。石炭纪至二叠纪期间本区下沉成为陆表海, 沉积了一套以碳酸盐岩为主体的浅—滨海相沉积物, 代表了相对稳定环境, 晚二叠世—早三叠世由于古特提斯洋向北俯冲, 陆壳碰撞并发生叠覆或陆内造山^[21], 260~240 Ma 是主要的俯冲造山期, 发育一套弧花岗岩类, 碰撞—后碰撞造山阶段主要发生在 237~210 Ma^[10]。卡而却卡矿区的花岗闪长岩($234.4 \pm 0.6 \text{ Ma}$)及暗色包体($234.1 \pm 0.6 \text{ Ma}$), 结合区域约格鲁角闪辉长岩体($239 \pm 6 \text{ Ma}$)、花岗闪长岩体($242 \pm 6 \text{ Ma}$)及其暗色微粒包体($241 \pm 5 \text{ Ma}$)^[18]、沟里含暗色包体花岗闪长岩($244 \pm 0.6 \text{ Ma}$)^[53]、石灰滩角闪辉长岩($226.4 \pm 0.4 \text{ Ma}$)^[19]、

表4 卡而却卡矿区花岗闪长岩及其暗色包体锆石原位 Hf 同位素组成

Table 4 In situ Hf isotopic data of zircons from granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit

样品号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2δ	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM}/Ma	$t_{2\text{DM}}/\text{Ma}$	f_{LuHf}
暗色微粒包体 (KE11-41-1)								
KE11-41-1-01	0.028976	0.000788	0.282586	0.000019	-1.6	937	1364	-0.98
KE11-41-1-02	0.031833	0.000870	0.282530	0.000022	-3.5	1018	1491	-0.97
KE11-41-1-03	0.013678	0.000386	0.282526	0.000021	-3.6	1011	1495	-0.99
KE11-41-1-04	0.024878	0.000670	0.282528	0.000020	-3.6	1016	1494	-0.98
KE11-41-1-05	0.028428	0.000767	0.282498	0.000024	-4.6	1060	1560	-0.98
KE11-41-1-06	0.023876	0.000631	0.282469	0.000022	-5.7	1097	1627	-0.98
KE11-41-1-07	0.027861	0.000729	0.282491	0.000023	-4.9	1068	1577	-0.98
KE11-41-1-08	0.028840	0.000749	0.282534	0.000024	-3.3	1008	1477	-0.98
KE11-41-1-09	0.020904	0.000553	0.282491	0.000023	-4.9	1063	1575	-0.98
KE11-41-1-10	0.045952	0.001199	0.282498	0.000021	-4.8	1072	1567	-0.96
KE11-41-1-11	0.026467	0.000732	0.282521	0.000022	-3.9	1027	1511	-0.98
KE11-41-1-12	0.020572	0.000632	0.282499	0.000022	-4.7	1055	1560	-0.98
KE11-41-1-13	0.026852	0.000815	0.282493	0.000020	-4.9	1068	1574	-0.98
KE11-41-1-14	0.029190	0.000868	0.282529	0.000024	-3.6	1020	1493	-0.97
KE11-41-1-15	0.026600	0.000743	0.282516	0.000023	-3.9	1034	1518	-0.98
KE11-41-1-16	0.028202	0.000708	0.282484	0.000022	-5.2	1078	1593	-0.98
KE11-41-1-17	0.026540	0.000681	0.282482	0.000022	-5.2	1080	1596	-0.98
KE11-41-1-18	0.027544	0.000703	0.282567	0.000022	-2.2	962	1407	-0.98
KE11-41-1-19	0.028843	0.000765	0.282515	0.000021	-4.1	1036	1523	-0.98
KE11-41-1-20	0.025026	0.000662	0.282553	0.000026	-2.7	981	1438	-0.98
KE11-41-1-21	0.022840	0.000618	0.282528	0.000022	-3.6	1015	1494	-0.98
KE11-41-1-22	0.027114	0.000786	0.282449	0.000020	-6.3	1129	1670	-0.98
KE11-41-1-23	0.021998	0.000617	0.282523	0.000021	-3.7	1021	1504	-0.98
花岗闪长岩 (KE11-41-2)								
KE11-41-2-1	0.024499	0.000664	0.282516	0.000017	-4.1	1031	1522	-0.98
KE11-41-2-2	0.029552	0.000804	0.282519	0.000020	-3.9	1031	1514	-0.98
KE11-41-2-3	0.028349	0.000761	0.282502	0.000017	-4.6	1055	1555	-0.98
KE11-41-2-4	0.035873	0.000891	0.282506	0.000022	-4.4	1052	1544	-0.97
KE11-41-2-5	0.021732	0.000592	0.282513	0.000020	-4.1	1033	1525	-0.98
KE11-41-2-6	0.025807	0.000717	0.282521	0.000018	-3.8	1027	1510	-0.98
KE11-41-2-7	0.028470	0.000789	0.282494	0.000019	-4.7	1066	1570	-0.98
KE11-41-2-8	0.024416	0.000684	0.282490	0.000019	-4.9	1069	1579	-0.98
KE11-41-2-9	0.028510	0.000805	0.282531	0.000019	-3.5	1015	1488	-0.98
KE11-41-2-10	0.026756	0.000782	0.282500	0.000019	-4.6	1057	1556	-0.98
KE11-41-2-11	0.023575	0.000668	0.282525	0.000019	-3.7	1020	1500	-0.98
KE11-41-2-12	0.025276	0.000708	0.282466	0.000019	-5.8	1102	1632	-0.98
KE11-41-2-13	0.021635	0.000604	0.282518	0.000019	-4.0	1028	1517	-0.98
KE11-41-2-14	0.035360	0.000965	0.282510	0.000017	-4.3	1048	1536	-0.97
KE11-41-2-15	0.022948	0.000601	0.282488	0.000021	-5.0	1070	1583	-0.98
KE11-41-2-16	0.025428	0.000686	0.282517	0.000020	-4.0	1031	1518	-0.98
KE11-41-2-17	0.029701	0.000795	0.282496	0.000017	-4.8	1064	1568	-0.98
KE11-41-2-18	0.021690	0.000556	0.282482	0.000018	-5.2	1076	1596	-0.98
KE11-41-2-19	0.026543	0.000665	0.282519	0.000018	-3.9	1028	1514	-0.98
KE11-41-2-20	0.031863	0.000753	0.282532	0.000018	-3.4	1012	1485	-0.98

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 10\,000 \times \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1\}$; $t_{\text{DM}} = 1 / \lambda \ln \{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$; $f_{\text{DM}} = t_{\text{DM}} - (t_{\text{DM}} - t) \times [(f_{\text{c}} - f_{\text{DM}})]$; $f_{\text{LuHf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1$; 其中: $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{s}}$ 为样品测量值, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772\,401$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25\,411$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{\text{c}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}] - 1$; $f_{\text{s}} = f_{\text{LuHf}} / f_{\text{DM}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}] - 1$ 。

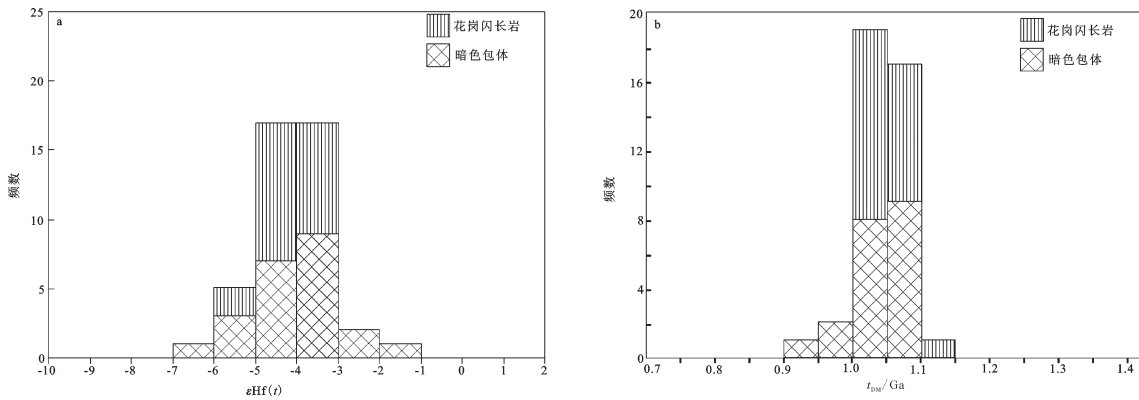


图9 卡而却卡矿区花岗闪长岩及其暗色包体Hf同位素分布直方图
Fig.9 Histograms of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (a) and $t_{\text{DM}}(b)$ of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit

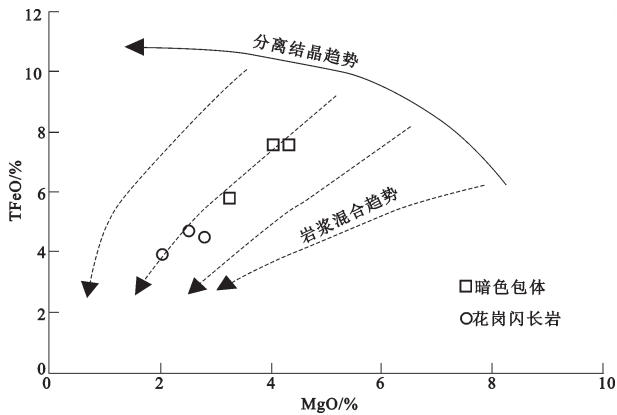


图10 卡而却卡矿区花岗闪长岩及其暗色包体TFeO-MgO演化图解(底图据文献[48])

Fig.10 TFeO-MgO diagram of granodiorites and enclaves in the Kaerqueka deposit (after reference [48])

虎头崖含暗色包体花岗闪长岩((235.4±1.8) Ma)^[22]、尕林格铁多金属矿床壳幔混合成因花岗岩((228.3±0.5) Ma~(234.4±0.6) Ma)^[54]、玛兴大坂壳幔混合特征二长花岗岩((218±2) Ma)^[55]等,暗示东昆仑地区在244~218 Ma俯冲—碰撞转换阶段—后碰撞阶段,东昆仑地区EM II型富集岩石圈地幔在上涌软流圈物质的作用下发生部分熔融产生基性岩浆,底侵的基性岩浆在下地壳聚集,巨大的热流促使下地壳物质发生部分熔融产生长英质岩浆,当深部热的基性岩浆注入已经侵位的长英质岩浆房后,由于温度和粘度等的不同,他们之间未达到热平衡状态,只是在两者边界发生能量交换,基性岩浆边部冷凝,长英质岩浆则被加热形成温度梯度,从而促使岩浆房内的长英质岩浆发生对流,基性岩浆也发生伸展及对流搅动,其内部基性组分发生分离结晶并形成微粒

包体,边界处则受到长英质岩浆的混染。对流促进了这种物理和化学过程的重复循环,经过演化的基性岩浆与长英质岩浆的温度差别越来越小,最终形成含微粒包体的均一岩浆,这种岩浆结晶后形成花岗闪长岩—二长花岗岩等。于沟子含绿钠闪石碱性花岗岩(210±1) Ma^[22]的发育暗示碰撞结束进入后造山伸展阶段。

6 结论

(1)卡而却卡矿区花岗闪长岩体中广泛分布具有似斑状结构的闪长质暗色包体,包体主要为椭圆形,定向排列,具有与寄主岩石相似的矿物组合,但角闪石含量明显比寄主岩石高,具有明显的不平衡反应结构,发育针状磷灰石,表现出岩浆混合的矿物学特征。

(2)LA-MC-ICP-MS 锆石U-Pb测试表明,暗色微粒包体形成于(234.1±0.6) Ma,寄主岩石花岗闪长岩形成于(234.4±0.6) Ma,为岩浆混合作用的存在提供了有力证据。

(3)卡而却卡矿区暗色包体SiO₂、MgO含量较寄主花岗闪长岩高,更偏基性;二者均富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素,但寄主花岗闪长岩Nb/Ta值(10.6~11.7)低于暗色包体(11.6~14.8)。花岗闪长岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-5.3~-4.2, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i值为0.71110~0.71125, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-5.8~-3.4, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 为1012~1102 Ma;暗色包体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-5.2~-5.0, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i值为0.71114~0.71171, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为-6.3~-1.6, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 为937~1129 Ma。含暗色包体花岗闪长岩为岩浆混合成因,起源于富集地幔的基性岩浆与起源

于古老陆壳重熔的长英质岩浆发生过混合, 并进行过热力学和成分上的交换。

(4)卡而却卡矿区含暗色包体花岗闪长岩形成于俯冲—碰撞转换阶段, 与古特提斯向北俯冲有关。

致谢: 笔者在野外工作期间, 得到青海省第三地质矿产勘查院野外一线工作人员等的大力协助; 西北大学大陆动力学实验室弓虎军副教授及中国地质科学院侯可军助理研究员在测试和数据处理过程中给予了有益的帮助; 研究过程中得到西安地质调查中心叶芳、李行研究员的有益指导; 在稿件审理和修改过程中得到审稿人及编辑部杨艳老师的支持与帮助, 并给予了有益指导; 在此向他们深表感谢。

参考文献(References):

- [1] 莫宣学. 岩浆与岩浆岩: 地球深部“探针”与演化记录[J]. 自然杂志, 2011, 33(5): 255–259.
Mo Xuanxue. Magma and magmatic/igneous rocks: A lithoprobe into the deep earth and records of the earth's evolution[J]. Chinese Journal of Nature, 2011, 33(5): 255–259 (in Chinese with English abstract).
- [2] Castro A, Moreno-Ventas I, de la Rosa J D. H-type (hybrid) granitoids: A proposed revision of the granite-type classification and nomenclature[J]. Earth Science Reviews, 1991, 31: 237–253.
- [3] Didier J, Barbarin B. Enclaves and Granite Petrology[M]. Elsevier: Amsterdam, 1991, 1–625.
- [4] Farnera M J, Lee C T A, Putirkab K D. Mafic-felsic magma mixing limited by reactive processes: A case study of biotite-rich rinds on mafic enclaves[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 393: 49–59.
- [5] 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, 156–159: 13–30.
- [6] Lan T G, Fan H R, Santosh M, et al. Crust-mantle interaction beneath the Luxi Block, eastern North China Craton: Evidence from coexisting mantle- and crust-derived enclaves in a quartz monzonite pluton[J]. Lithos, 2013, 177: 1–16.
- [7] Liu L, Qiu J S, Li Z. Origin of mafic microgranular enclaves (MMEs) and their host quartz monzonites from the Muchen pluton in Zhejiang Province, Southeast China: Implications for magma mixing and crust-mantle interaction[J]. Lithos, 2013, 160–161: 145–163.
- [8] Silva M M V G, Neiva A M R, Whitehouse M J. Geochemistry of enclaves and host granites from the Nelas area, central Portugal[J]. Lithos, 2000, 50: 153–170.
- [9] Yang L Q, Deng J, Qiu K F, et al. Magma mixing and crust-mantle interaction in the Triassic monzogranites of Bikou Terrane, central China: Constraints from petrology, geochemistry, and zircon U–Pb–Hf isotopic systematic[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 98: 320–341.
- [10] 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).
- [11] 李荣社, 计文化, 杨永成. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1–400.
Li Rongshe, Ji Wenhua, Yang Yongcheng. The Geology in Kunlun and its Adjacent Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1–400 (in Chinese).
- [12] 赵文津, 吴珍汉, 史大年, 等. 昆仑山深部结构与造山机制[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 1–18.
Zhao Wenjin, Wu Zhenhan, Shi Dalian, et al. Deep structure and orogenic mechanism of the Kunlun Mountains[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 1–18 (in Chinese with English abstract).
- [13] 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 等. 青藏东昆仑晚古生代末—中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. 现代地质, 1998, 12(3): 344–352.
Guo Zhengfu, Deng Jinfu, Xu Zhiqin, 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): 344–352 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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. The record of Indosinian tectonic setting from the granitoid of Eastern Kunlun Mountains[J]. Geological Review, 2000, 46(2): 203–211 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等. 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[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1044–1065.
Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Late Triassic magma mixing in the East Kunlun orogenic belt: A case study of Helegang Xilikete granodiorites[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1044–1065 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘成东, 张文秦, 莫宣学, 等. 东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征与成因[J]. 地质通报, 2002, 21(11): 739–744.
Liu Chengdong, Zhang Wenqin, Mo Xuanxue, et al. Features and origin of mafic microgranular enclaves in the Yuegelu granite in the Eastern Kunlun[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(11): 739–744 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等. 东昆仑造山带花岗岩类 Pb–Sr–Nd–O 同位素特征[J]. 地球学报, 2003, 24(6): 584–588.
Liu Chengdong, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, et al. Pb–Sr–Nd–O isotope characteristics of granitoids in East Kunlun orogenic belt[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2003, 24(6): 584–588 (in Chinese with English abstract).
- [18] Liu Chengdong, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, et al. Mixing events

- between the crust- and mantle- derived magmas in Eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP II chronology[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(8): 828-834.
- [19] 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. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(6): 292-297 (in Chinese with English abstract).
- [20] 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).
- [21] 丰成友, 王松, 李国臣, 等. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成因意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 665-678.
Feng Chengyou, Wang Song, Li Guochen, et al. Middle to late Triassic granitoids in the Qimantag area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 665-678 (in Chinese with English abstract).
- [22] 高永宝. 东昆仑祁漫塔格地区中酸性侵入岩浆活动与成矿作用[D]. 西安: 长安大学博士论文, 2013.
Gao Yongbao. The Intermediate-Acid Intrusive Magmatism and Mineralization in Qimantag, East Kunlun Mountains[D]. Xi'an: Thesis for Doctor Degree of Chang'an University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [23] 高永宝, 李文渊, 钱兵, 等. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1647-1665.
Gao Yongbao, Li Wenyuan, Qian Bing, et al. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the granitic rocks related with iron mineralization in Yemaquan deposit, East Kunlun, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1647-1665 (in Chinese with English abstract).
- [24] 高永宝, 李文渊, 谭文娟. 祁漫塔格地区成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 35-43.
Gao Yongbao, Li Wenyuan, Tan Wenjuan. Metallogenic characteristics and analysis of the prospecting potential in the area of Qimantag[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 35-43 (in Chinese with English abstract).
- [25] 丰成友, 李东生, 吴正寿, 等. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 10-17.
Feng Chengyou, Li Dongsheng, Wu Zhengshou, et al. Major types, time-space distribution and metallogenesis of polymetallic deposits in the Qimantage metallogenic belt, Eastern Kunlun area[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 10-17 (in Chinese with English abstract).
- [26] 刘渭, 杨兴科, 王守良, 等. 青海省祁漫塔格矿带虎头崖矿田构造控矿特征[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 222-234.
Liuwei, Yang Xingke, Wang Shouliang, et al. Characteristics of ore-controlling structures of the Hutouya orefield in the Qimantag metallogenic belt, Qinghai Province[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 222-234 (in Chinese with English abstract).
- [27] 苏旭亮, 赵永亮, 赵闯, 等. 东昆仑祁漫塔格克停哈尔斑岩型铜钼矿找矿突破思路及找矿模型[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 2048-2062.
Su Xuliang, Zhao Yongliang, Zhao Chuang, et al. Prospecting thinking and model for the Ketinghaer porphyry copper molybdenum deposit in the East Kunlun Mountains[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2048-2062 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王富春, 陈静, 谢志勇, 等. 东昆仑拉陵灶火钼多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素定年[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1209-1217.
Wang Fuchun, Chen Jing, Xie Zhiyong, et al. Geological features and Re-Os isotopic dating of the Lalingzaohuo molybdenum polymetallic deposit in East Kunlun[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1209-1217 (in Chinese with English abstract).
- [29] 张爱奎, 莫宣学, 李云平, 等. 青海西部祁漫塔格成矿带找矿新进展及其意义[J]. 地质通报, 2010, 29(7): 1062-1074.
Zhang Aikui, Mo Xuanxue, Li Yunping, et al. New progress and significance in the Qimantag metallogenic belt prospecting, western Qinghai, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(7): 1062-1074 (in Chinese with English abstract).
- [30] 王松, 丰成友, 李世金, 等. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 74-84.
Wang Song, Feng Chengyou, Li Shijin, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in the Kaerqueka polymetallic ore deposit, Qimantage Mountain, Qinghai Province, and its geological implications[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 74-84 (in Chinese with English abstract).
- [31] Slama J, Kosler J, Condon D J, et al. Plesovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 2008, 249(1/2): 1-35.
- [32] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [33] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481-492.
Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 481-492 (in Chinese with English abstract).
- [34] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2595-2604.
Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, et al. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- [35] Elhous S, Belousova E, Griffin W L, et al. Trace element and

- isotopic composition of GJ- red zircon standard by laser ablation[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70(18 s): A158.
- [36] 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: I. 岩石学和同位素地质年代学[J]. *地球化学*, 2000, 29(6): 513-520.
Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, et al. Mesozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance: I. Petrology and isotope geochronology[J]. *Geochimica*, 2000, 29(6): 513-520 (in Chinese with English abstract).
- [37] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J (ed.). *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Soc Spec Pub, 1989: 313-345.
- [38] Workman R K and Hart S R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 231(1/2): 53-72.
- [39] Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(3/4): 311-324.
- [40] Blichert T J and Albarède F. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1/2): 243-258.
- [41] Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(1): 133-147.
- [42] 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(2): 161-168.
Wang Tao. Origin of hybrid granitoids and the implications for continental dynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(2): 161-168 (in Chinese with English abstract).
- [43] Hibbard M J. The magma mixing origin of mantled feldspar[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1981, 76: 158-170.
- [44] Kadioglu Y K, Gulec N. Types and genesis of the enclaves in Central Anatolian granitoids[J]. *Geology Journal*, 1999, 34(3): 243-256.
- [45] Perugini D, Poli G, Christofides G, et al. Magma mixing in the Sithonia Plutonic Complex, Greece: evidence from mafic microgranular enclaves[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2003, 78(3/4): 173-200.
- [46] Barbarin B, Didier J. Macroscopic features of mafic microgranular enclaves[C]// Didier J, Barbarin B (Ed.). *Enclaves and Granite Petrology*, Amsterdam: Elsevier, 1991: 253-261.
- [47] 邹涛, 王玉往, 王京彬, 等. 内蒙古敖伦花斑岩铜钼矿含矿斑岩的岩浆混合特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(Sup. 2): 171-187.
Zou Tao, Wang Yuwang, Wang Jingbin, et al. Magma mixing characteristics and geological significance of host porphyry from the Aolunhua Mo-Cu Deposit, inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012, 42 (Sup. 2): 171-187 (in Chinese with English abstract).
- [48] Zorpi M J, Coulon C, Orsini J B, et al. Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons[J]. *Tectonophysics*, 1989: 157.
- [49] 余能, 金巍, 葛文春, 等. 东昆仑金水口过铝花岗岩的地球化学研究[J]. *世界地质*, 2005, 24(2): 123-128.
Yu Neng, Jin Wei, Ge Wenjun, et al. Geochemical study on peraluminous granite from Jinshuikou in East Kunlun[J]. *Global Geology*, 2005, 24(2): 123-128 (in Chinese with English abstract).
- [50] 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).
- [51] 任继舜, 姜春发, 张正坤, 等. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-124.
Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun, et al. *Tectonics and Evolution of China*[M]. Beijing: Science Press, 1980: 1-124 (in Chinese with English abstract).
- [52] 殷鸿福, 张克信. 中央造山带的演化及其特点[J]. *地球科学*, 1998, 23(5): 437-442.
Yin Hongfu and Zhang Kexin. Evolution and characteristics of the Central Orogenic Belt[J]. *Earth Science*, 23(5): 437-442 (in Chinese with English abstract).
- [53] 陈广俊, 孙丰月, 李碧乐, 等. 东昆仑沟里地区暗色包体及其寄主岩石地球化学特征及成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(3): 892-904.
Chen Guangjun, Sun Fengyue, Li Bile, et al. Geochemistry and petrogenesis of Gouli mafic enclaves and their host rocks in eastern Kunlun[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(3): 892-904 (in Chinese with English abstract).
- [54] 高永宝, 李文渊, 马晓光, 等. 东昆仑杂林格铁矿床成因年代学及 Hf 同位素制约[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(2): 36-47.
Gao Yongbao, Li Wenyuan, Ma Xiaoguang, et al. Genesis, geochronology and Hf isotopic compositions of the magmatic rocks in Galinge iron deposit, Eastern Kunlun[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2012, 48(2): 36-47 (in Chinese with English abstract).
- [55] 吴祥珂, 孟繁聪, 许虹, 等. 青海祁漫塔格玛兴大坂晚三叠世花岗岩年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3380-3394.
Wu Xiangke, Meng Fancong, Xu Hong, et al. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd-Hf isotopic compositions of the Mxingdaban Late Triassic granitic pluton from Qimantag in the eastern Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3380-3394 (in Chinese with English abstract).