

喜马拉雅造山带新生代花岗岩中两类石榴石的地球化学特征及其在地壳深熔作用中的意义*

高利娥¹ 曾令森¹ 石卫刚² 陈振宇³ 胡明月⁴ 孙东阳⁴

GAO LiE¹, ZENG LingSen¹, SHI WeiGang², CHEN Zhenyu³, HU MingYue⁴ and SUN DongYang⁴

1. 中国地质科学院地质研究所, 大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037

2. 陕西省地矿局区域地质矿产研究院, 咸阳 712000

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

4. 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037

1. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Institute of Regional Geology and Mineral Resource, Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources Development, Xianyang 712000, China

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

4. National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2011-12-10 收稿, 2012-05-08 改回.

Gao LE, Zeng LS, Shi WG, Chen ZY, Hu MY and Sun DY. 2012. Two types of garnets in the Cenozoic granites from the Himalayan Orogenic Belt: Geochemical characteristics and implications for crustal anatexis. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2963 – 2980

Abstract In the Himalayan Orogenic Belt, garnets occur as one of the key constituent phases in metapelites as well as one of the important accessory phases in leucogranites or leucosomes in migmatites. They have preserved critical information with regard to the geochemical nature of crustal anatexis and could yield important insights on the physical and chemical processes of middle to lower crustal rocks in large collisional orogenic belts. Along the Himalayan orogenic belt, two types of garnets, magmatic and metamorphic, occur in Cenozoic granitic rocks (leucogranite and leucosome). Magmatic garnets are euhedral to subhedral and commonly free of inclusions, whereas those derived from the source rocks show embayment texture and have been subjected to various degrees of melt-garnet reactions. Chemical analyses show that magmatic garnets are characterized by (1) typical oscillatory growth zonation; (2) enrichment in HREE, but highly depletion in LREE, and rim-ward decreases in Hf, Y and HREE; (3) pronounced negative Eu anomalies; (4) elevated Mn and Zn concentrations relative to those in metamorphic garnets derived from the source rocks. Petrographic and geochemical characteristics of garnets from leucogranites suggests that a large portion of Zn was incorporated in garnet and fractional crystallization of plagioclase and zircon is the major factor that regulate the magnitude of negative Eu anomalies and the abundance and rim-ward decreasing pattern of Hf, Y and HREE in magmatic garnet. Our data indicate that fine-scale chemical variations in magmatic garnet could serve as another important revenue to unravel the magmatic processes during the crystallization of leucogranitic melts.

Key words Leucogranite; Garnet; Trace element geochemistry; Crustal anatexis; Himalayan Orogenic Belt

摘要 在喜马拉雅碰撞造山带中, 石榴石是变泥质岩的主要造岩矿物, 也是花岗岩或淡色体的重要副矿物, 保存了有关地壳深熔作用的关键信息, 是揭示大型碰撞造山带中-下地壳物质的物理和化学行为的重要载体。在喜马拉雅造山带内, 新生代花岗岩质岩石(淡色花岗岩和混合岩中的淡色体)含两类石榴石, 大多数为岩浆型石榴石, 自形-半自形, 不含包裹体, 但淡色体中含有港湾状的混合型石榴石。岩浆型石榴石具有以下地球化学特征: (1) 从核部到边部, 显示了典型的“振荡型”生长环带; (2) 富集 HREE, 亏损 LREE, 从核部到边部, Hf、Y 和 HREE 含量降低; (3) 显著的 Eu 负异常; (4) 相对于源岩中变质石榴石, Mn 和 Zn 的含量显著增高。岩相学和地球化学特征都表明: 变泥质岩熔融形成的熔体(淡色体)捕获了源岩的变质石榴石, 熔体与石榴石反应导致大部分元素的特征被改变, 只在核部保留了源岩的部分信息。同时, 在花岗质熔体结晶过程中, 形成少量的岩浆型石榴石。这些石榴石摄取了熔体中大量的 Zn, 浓度显著升高, 在斜长石和锆石同步分离结晶作用的共同影响下, 石榴石中 Eu 为明显负异常, Hf、Y 和 HREE 浓度从核部到边部逐渐降低。上述数据和结果表明, 花岗岩中石榴石的矿物化

* 本文受中国地壳探测项目(SinoProbe-2-6)、科技部 973 项目(2011CB403102)和国家自然科学基金项目(41073024)联合资助。

第一作者简介: 高利娥, 女, 1983 年生, 博士生, 岩石学专业, E-mail: liegao09@gmail.com

学特征记录了精细的有关花岗岩岩浆演化的重要信息。

关键词 淡色花岗岩; 石榴石; 微量元素地球化学; 地壳深熔作用; 喜马拉雅造山带

中图法分类号 P595

在中-高级变泥质岩中,石榴石是常见的主要造岩矿物, MnO 含量的增加是促进石榴石形成和增加其稳定性的主要因素(Symmes and Ferry, 1992)。在贫 MnO 的变泥质岩系统中,只有在那些具有高 Fe/Mg 比的岩石中才出现石榴石(Symmes and Ferry, 1992)。石榴石也以副矿物的形式出现在花岗岩或混合岩的淡色体中,通常具有高 MnO 的特征(Hall, 1965; Warren, 1970; Cawthorn and Brown, 1976; Green, 1976, 1977; Abbott, 1981; Allan and Clarke, 1981; Miller and Stoddard, 1981; Du Bray, 1988; Stevens *et al.*, 2007; Villaros *et al.*, 2009),但其成因及蕴含的岩石学和地球化学意义认识较薄弱,存在许多争议。早期研究认为花岗岩中出现石榴石是由于这些花岗岩具有较高的 MnO (Hall, 1965)。但许多含石榴石花岗岩的 MnO 含量并不高,常常非常低(~0.1%),与许多不含石榴石花岗岩的浓度相当,这显然与早期认识相悖。虽然对花岗岩中石榴石的矿物化学特征研究有限,主要依据花岗岩中石榴石的主量元素特征,不同学者提出了以下模型来解释花岗岩中石榴石的成因:(1)围岩(尤其是变泥质岩)混染(Warren, 1970; Allan and Clarke, 1981),即在花岗岩岩浆侵位过程中,捕获围岩中的石榴石;(2)花岗岩岩浆在高压条件下(>7kbar)结晶形成的斑晶(Green, 1976, 1977),认为花岗岩的石榴石可指示岩浆的形成深度;(3)在中-低压条件下,从过铝质岩浆中结晶形成(Cawthorn and Brown, 1976; Allan and Clarke, 1981);(4)在岩浆演化后期,贫 Mn 矿物(如石英和长石)的分离结晶作用,导致岩浆的 Mn 升高,促使石榴石形成(Abbott, 1981; Miller and Stoddard, 1981);或(5)在变泥质岩部分熔融过程中,尤其是在黑云母脱水部分熔融作用下,熔体捕获转熔作用形成的石榴石(Zeng *et al.*, 2005; Stevens *et al.*, 2007; 曾令森等, 2008; Villaros *et al.*, 2009)。从本质上来说,上述模型可分为三类,混染型、岩浆型和转熔型,各自形成的石榴石应在矿物化学特征上表现出较明显的差异。模型-1(混染型)所形成的石榴石应表现出围岩石榴石(变质作用形成的石榴石)的特征,与花岗岩本身的关系较弱,但可能经历一定程度的石榴石-熔体的反应。模型-2,-3 和-4(岩浆型)都与花岗岩的结晶作用相关,都应该是岩浆型石榴石,反映了花岗岩本身所经历的岩浆演化过程,与围岩或源岩中石榴石相比,该类石榴石具有独特的矿物化学(化学成分环带、微量和稀土元素地球化学)特征。模型-5(转熔型)则预示着花岗岩中的石榴石具有熔体与源岩的混合特征,该类石榴石可能影响淡色花岗岩的元素和 Nd 同位素地球化学特征(Stevens *et al.*, 2007; Zeng *et al.*, 2012)。已有的研究结果已揭示了岩浆型石榴石普遍具有高 Mn 和高 Zn,及 Mn 含量向边部递减的成分环带等特征。由于多数 S-型花岗岩的源

岩是变泥质岩,淡色花岗岩中的石榴石是否与变泥质岩内的石榴石存在矿物学或地球化学上的联系是有待深入探讨的问题。另外,在花岗岩中,石榴石和锆石都是 HREE 和 Y 的重要赋存矿物,同时石榴石还是 Sc 和 Zn 的重要赋存矿物。因此揭示花岗岩中石榴石的微量元素地球化学特征,是探讨花岗岩中 HREE、Y、Sc 和 Zn 等微量元素地球化学行为的关键,是理解地壳部分熔融过程中副矿物作用的探针(Spear and Kohn, 1996),是分析相平衡和地壳中深熔作用动力学过程的有力工具(Hiroi and Ellis, 1994)。

印度板块和欧亚大陆在新生代发生碰撞作用,形成了喜马拉雅造山带,是世界上碰撞造山带的典例(Burg *et al.*, 1984; Hodges *et al.*, 1992; Hodges, 2000; Beaumont *et al.*, 2001; 许志琴等, 2005)。在喜马拉雅碰撞造山带的构造演化过程中,中-下地壳岩石普遍经历了多期次的高级变质作用和部分熔融事件(Ding *et al.*, 2005; Aikman *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009; Zeng *et al.*, 2009, 2011a, 2012; 高利娥等, 2009, 2010; Gao *et al.*, 2012),形成了各种类型的变质岩、花岗岩和混合岩。在众多变质岩中,石榴石是主要造岩矿物;在淡色花岗岩和淡色体中,石榴石是常见的副矿物,保存了造山带演化过程的重要信息。通过详细研究花岗岩中石榴石的地球化学成分特征,可以探讨其在地壳深熔作用中的矿物响应。我们以喜马拉雅造山带内雅拉香波、珠峰、定结和亚东地区的新生代花岗岩中的石榴石为研究对象,开展了详细的、系统的岩相学分析、主量元素和微量元素测试,来探讨新生代花岗岩中石榴石的地球化学特征和形成过程,从而限定石榴石在地壳深熔作用中的意义,刻画在喜马拉雅造山带中部分熔融作用的演化过程。

1 地质背景及样品描述

喜马拉雅造山带呈 E-W 向弧形展布(图 1),长 2500km,宽 300~500km,北侧以雅鲁藏布江缝合带(YTS)与拉萨地体南部的冈底斯活动陆缘增生带为邻,南侧以喜马拉雅主前缘逆冲断层(MFT)与印度克拉通为界(许志琴等, 2008)。喜马拉雅构造带由印度陆块边缘的前寒武纪变质基底,特提斯沉积岩以及侵入其中的新生代花岗岩组成。自北向南依次划分为 4 个构造单元:北喜马拉雅片麻岩穹窿(NHGD, 也称特提斯喜马拉雅带)、高喜马拉雅结晶岩系(HHCS)、低喜马拉雅岩系(LHS)和次喜马拉雅岩系(SHS)。它们之间的界限分别为藏南拆离系(STDS)、主中央逆冲断层(MCT)、主边界逆冲断层(MBT)(图 1)。

在喜马拉雅碰撞造山带演化过程中,在演化的不同阶段,中下地壳岩石发生了不同类型的高级变质和部分熔融作

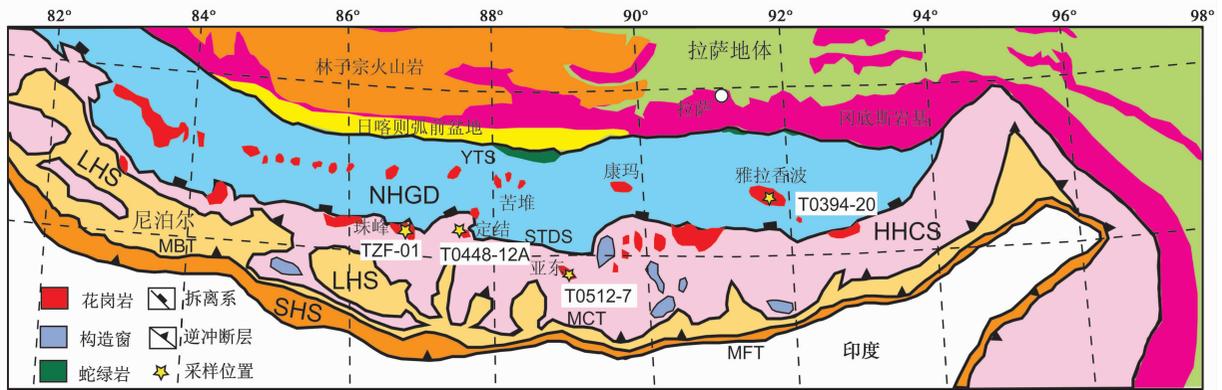


图1 喜马拉雅造山带地质简图

YTS-雅鲁藏布江缝合带;STDS-藏南拆离系;MCT-主中央逆冲断层;MBT-主边界逆冲断层;MFT-主前缘逆冲断层;NHGD-北喜马拉雅片麻岩穹窿;HHCS-高喜马拉雅结晶岩系;LHS-低喜马拉雅岩系;SHS-次喜马拉雅岩系

Fig. 1 Simplified geologic map of the Himalayan Orogenic Belt, Southern Tibet

YTS-Yalung-Tsangpo suture; STDS-Southern Tibet Detachment System; MCT-Main Central Thrust; MBT-Main Boundary Thrust; MFT-Main Frontal Thrust; NHGD-Northern Himalayan Gneiss Dome; HHCS-High Himalayan Crystalline Sequence; LHS-Lower Himalayan System; SHS-Sub-Himalayan System

用,形成了各种各样的高级变质岩、花岗岩和混合岩,主要分布于近平行的高喜马拉雅结晶岩系(HHCS)和北喜马拉雅穹窿(NHGD)内(图1)。在地质产状、形成时间、地球化学特征和形成机制等方面,这两条带内的花岗岩显示明显的差异性(Le Fort, 1981; Debon *et al.*, 1986; Schärer *et al.*, 1986; Deniel *et al.*, 1987; Harrison *et al.*, 1987; Le Fort *et al.*, 1987; Inger and Harris, 1993; Guillot and Le Fort, 1995; Searle *et al.*, 1997; Harrison *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2004a, b; Aoya *et al.*, 2005; Searle and Szulc, 2005; Zeng *et al.*, 2011a; King *et al.*, 2011)。北喜马拉雅穹窿内,沿东西向断续分布着一系列穹窿,不同的穹窿在细节上稍有差别,但总体上显示了相似的特征,核部由高级变质岩和侵入其中的花岗岩组成,边部为浅变质或未变质的特提斯沉积岩系,两者之间被韧性拆离断层分割。康玛穹窿的核部花岗岩形成于早古生代(566~507Ma)(Schärer *et al.*, 1986; Lee *et al.*, 2000; Cawood *et al.*, 2007; Quigley *et al.*, 2008),和普兰纳木那尼穹窿的核部片麻岩为亲低喜马拉雅岩系(Murphy, 2007),其余穹窿中的花岗岩的形成时间为新生代(44~10Ma)(Schärer *et al.*, 1986; Harrison *et al.*, 1987; Zhang *et al.*, 2004b; Aoya *et al.*, 2005; Lee and Whitehouse, 2007; Aikman *et al.*, 2008; King *et al.*, 2011; Zeng *et al.*, 2011a),高级片麻岩具有与高喜马拉雅结晶岩相似的矿物组成和地球化学特征,被认为是高喜马拉雅岩系折返过程中侵入到特提斯沉积岩中。在高喜马拉雅带中,含有大量的不同类型的变质岩,新生代花岗岩(37~10Ma)直接侵入到高喜马拉雅结晶岩系中。

雅拉香波穹窿位于北喜马拉雅穹窿的最东端,自核部向边部依次由高级变质岩系、中级变质岩系和沉积岩系3个岩石单元及侵入其中的花岗岩体组成,各岩石单元之间为韧性

或脆韧性拆离断层环绕穹窿分布(张进江等, 2007)。高级变质岩包括记录了约47.6Ma角闪岩相变质作用的眼球状花岗岩片麻岩(高利娥等, 2011)、含石榴石和夕线石的泥质片麻岩、45.0Ma的变质作用形成的石榴角闪岩(Gao *et al.*, 2012)、石榴辉石岩等;中级变质岩由石榴石二云母片岩、石榴石二云母石英片岩、石榴石石墨片岩等组成。在雅拉香波穹窿及其周缘地区,广泛发育不同类型的花岗岩,包括形成于约43~44Ma、具有高Sr/Y和Na/K比的三个二云母花岗岩体(Aikman *et al.*, 2008; 戚学祥等, 2008; Zeng *et al.*, 2011a),岩脉状侵入到片岩中的 35.3 ± 1.1 Ma淡色花岗岩(曾令森等, 2009),和形成于17.7~20.0Ma具有高Sr/Y比的花岗斑岩和较大型淡色花岗岩岩体(高利娥, 2010; Zeng *et al.*, 2011b)。

珠峰、定结和亚东都位于高喜马拉雅带中。珠峰地区主要为呈岩席或岩墙状产出的中新世淡色花岗岩侵入到高喜马拉雅结晶岩系内。淡色花岗岩具有多期次形成的特征,即 20.8 ± 0.8 Ma、 16.7 ± 0.4 Ma、 15.2 ± 0.2 Ma、 12.6 ± 0.2 Ma(Cottle *et al.*, 2009)。高喜马拉雅结晶岩系主要由角闪岩相-麻粒岩相的泥质片麻岩、眼球状花岗质片麻岩、钙质硅酸盐岩、大理岩及石榴辉石岩组成,珠峰地区的变质岩记录了38.9~16.1Ma长达约20Ma的变质作用(Cottle *et al.*, 2009)。定结地区位于高喜马拉雅中段明显向北突出的构造部位,两侧分别为定结正断层和日玛那正断层,这两条南北向正断层切断北侧紧邻的STDS。主要由角闪岩相-麻粒岩相的变泥质岩、花岗质片麻岩、变基性岩(石榴角闪岩、石榴辉石岩、榴辉岩),以及大规模淡色花岗岩组成。已有研究表明,定结地区的变质岩主要经历了4阶段的变质作用:榴辉岩相-早期麻粒岩相-晚期麻粒岩相-退变质角闪岩相(Liu *et al.*, 2005; Gropo *et al.*, 2007; Corrie *et al.*, 2010)。退变质榴

辉岩中锆石年龄为 $17.6 \pm 0.3\text{Ma}$ (Lombardo and Rolfo, 2000; Li *et al.*, 2003), 花岗片麻岩中退变质年龄为 $22.2 \pm 1.4\text{Ma}$ (于俊杰等, 2011)。淡色花岗岩具有 $21.0 \pm 0.7\text{Ma}$ 和 $15.8 \pm 0.1\text{Ma}$ 两期岩浆结晶年龄 (于俊杰等, 2011)。亚东淡色花岗岩位于藏南拆离系和亚东裂谷的交接部位, 围岩主要是前寒武纪副变质岩, 属于高喜马拉雅结晶岩系的一部分。该地区的花岗岩包括两类, 含黑云母和含电气石淡色花岗岩。

样品 T0394-20 是淡色花岗岩, 采自于雅拉香波穹窿。样品 T0448-12A 采自于定结日玛那穹窿, 为混合岩化泥质片麻岩中的淡色体。样品 TZF-1 采自于珠峰地区大本营附近, 为侵入到大理岩和泥质片麻岩中的含电气石淡色花岗岩。样品 T0512-7 采自于亚东, 为含黑云母淡色花岗岩, 侵入到泥质片麻岩中 (图 1)。从岩相学特征来看 (图 2), 这些淡色花岗岩具有相似的结构, 但在组成矿物上具有明显的差异。样品 T0394-20 由石英、斜长石、钾长石和少量的石榴石、夕线石组成 (图 2a)。样品 TZF-1 除了石英、斜长石、钾长石和白云母外 (图 2b), 含有少量的自型且具有明显生长环带的电气石, 粒度达 1mm ; 而 T0512-7 中含有少量的黑云母。淡色体 T0448-12A 含约 10% 的夕线石 (图 2d), 可能是白云母脱水熔融的产物。从石榴石的形态来看, 淡色花岗岩中的石

榴石都为自形-半自形, 六边形或椭圆形, 几乎不含包裹体 (图 2a-c), 粒度约为 $200 \sim 600\mu\text{m}$; 相反地, 淡色体中的石榴石含有一定的包裹体, 他形, 边部呈现与溶蚀相关的港湾状结构 (图 2d), 与暗色体中的石榴石相似。

2 分析方法

石榴石主量元素的成分测试在北京大学地球与空间科学学院造山带与成矿作用重点实验室的 JEOL-JXA-8800 型电子探针仪上进行, 加速电压为 15kV ; 电子束 $1 \times 10^{-8}\text{A}$, 电子束斑 $1\mu\text{m}$ 。石榴石单矿物电子探针分析结果见表 1。

石榴石微区原位微量元素分析在国土资源部国家地质测试分析研究中心进行。所用仪器为 Finnigan ELEMENT 2 ICP-MS。激光剥蚀系统为新浪 UP-213nm 激光器。分析采用的激光剥蚀孔径为 $44\mu\text{m}$, 激光脉冲为 10Hz , 能量为 90mJ 。详细的分析方法和流程同胡明月等 (2008)。数据处理过程中选择 Ca 作为内标元素, 国际标准玻璃 NIST610 用于外标校正。绝大部分微量元素分析的准确度优于 10%, Be, P, Ni, Zn, Ga 和 Yb 的准确度优于 20%。石榴石单矿物 LA-ICP-MS 分析结果见表 2。

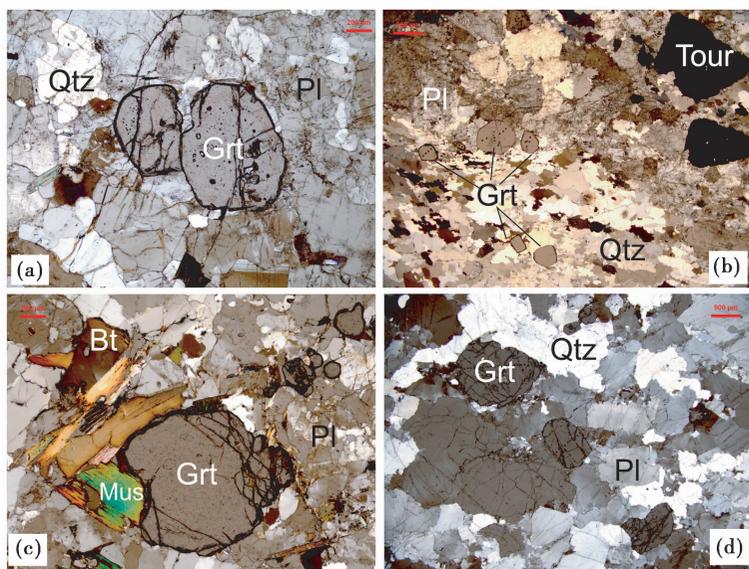


图 2 喜马拉雅造山带中不同地区含石榴石淡色花岗岩或淡色体的显微照片

(a)-样品 T0394-20 为雅拉香波穹窿的淡色花岗岩, 主要由石英、斜长石、钾长石、少量的石榴石和夕线石组成, 石榴石为半自形; (b)-样品 TZF-1 为珠峰地区的淡色花岗岩, 主要由石英、斜长石、钾长石、少量的石榴石和电气石组成, 石榴石也为半自形; (c)-样品 T0512-7 为亚东地区的淡色花岗岩, 主要由石英、斜长石、白云母、钾长石、少量的石榴石和黑云母组成, 石榴石较自形, 为近六边形; (d)-样品 T0448-12A 为定结地区混合岩化泥质片麻岩中的淡色体, 主要由石英、斜长石、钾长石、少量的石榴石和夕线石组成, 石榴石含有一定的包裹体, 他形, 边部呈港湾状。矿物代号: Bt-黑云母; Grt-石榴石; Pl-斜长石; Mus-白云母; Qtz-石英; Tour-电气石

Fig. 2 Photomicrographs showing the mineral assemblages and textures of granites and metapelite-hosted leucosome from different areas along the Himalayan Orogenic Belt

(a)-sample T0394-20, a leucogranite from the Yardo area, consists of quartz, plagioclase, K-feldspar with minor sub-euhedral garnet and sillimanite; (b)-sample TZF-1, a leucogranite from the Everest area, consists of quartz, plagioclase, K-feldspar with minor sub-euhedral garnet and tourmaline; (c)-sample T0512-7, a leucogranite from the Yadong area, consists of quartz, plagioclase, muscovite and K-feldspar with minor euhedral garnet and biotite; (d)-sample T0448-12A, a leucosome within a migmatitic metapelite from the Dinggye area, consists of quartz, plagioclase, K-feldspar with minor garnet and sillimanite. Bt-biotite; Grt-Garnet; Pl-plagioclase; Mus-muscovite; Qtz-quartz; Tour-tourmaline

表 1 喜马拉雅造山带中不同地区淡色花岗岩类中石榴石的主量元素地球化学特征 (wt%)

Table 1 Chemical composition of garnets in leucogranites and metapelite-hosted leucosome from different areas along Himalayan Orogenic Belt (wt%)

位置	雅拉香波						珠峰							
	淡色花岗岩						淡色花岗岩							
岩性														
测点号	T0394-20	T0394-20	T0394-20	T0394-20	T0394-20	T0394-20	TZF-1							
	_1.1	_1.2	_1.3	_1.4	_1.5	_1.6	_3.1	_3.2	_3.3	_3.4	_3.5	_3.6	_3.7	_3.8
SiO ₂	36.43	36.24	36.37	36.32	36.39	36.25	36.55	36.21	36.41	36.38	36.35	36.40	36.39	36.39
TiO ₂	0.00	0.05	0.01	0.04	0.00	0.04	0.05	0.05	0.00	0.01	0.00	0.08	0.04	0.00
Al ₂ O ₃	20.54	20.36	20.52	20.76	20.62	20.11	20.22	20.06	19.99	20.22	20.22	20.91	19.97	19.97
FeO	31.60	31.30	30.31	30.02	31.88	32.79	36.10	36.13	36.28	35.88	36.26	34.94	36.21	35.92
MnO	9.23	9.54	10.56	10.52	9.01	9.11	5.65	5.91	6.09	6.20	6.05	6.00	6.08	5.90
MgO	0.49	0.51	0.49	0.60	0.58	0.58	1.03	1.06	1.08	1.07	1.05	1.05	1.10	1.06
CaO	1.24	1.30	1.53	1.54	1.35	1.06	0.63	0.43	0.43	0.48	0.44	0.48	0.47	0.57
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.03	0.04	0.00	0.02	0.04	0.00	0.03	0.00
K ₂ O	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Cr ₂ O ₃	0.02	0.02	0.03	0.00	0.04	0.04	0.00	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03
NiO	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
总量	99.6	99.4	99.8	99.8	99.9	100.1	100.3	99.9	100.3	100.3	100.4	99.9	100.3	99.8
O. N.	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
TSi	3.004	2.998	2.993	2.986	2.993	2.987	2.997	2.985	2.990	2.986	2.983	2.983	2.989	2.998
TAl	0.000	0.002	0.007	0.014	0.007	0.013	0.003	0.015	0.010	0.014	0.017	0.017	0.011	0.002
Al vi	1.997	1.984	1.985	1.998	1.992	1.943	1.954	1.938	1.929	1.946	1.942	2.004	1.927	1.941
Ti	0.000	0.003	0.001	0.002	0.000	0.002	0.003	0.003	0.000	0.001	0.000	0.005	0.002	0.000
Cr	0.001	0.001	0.002	0.000	0.003	0.003	0.000	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002
Fe ³⁺	0.000	0.010	0.011	0.000	0.005	0.046	0.038	0.050	0.061	0.046	0.051	0.000	0.062	0.050
Fe ²⁺	2.181	2.155	2.075	2.064	2.188	2.214	2.438	2.441	2.430	2.417	2.437	2.406	2.425	2.425
Mn	0.645	0.668	0.736	0.733	0.628	0.636	0.392	0.413	0.424	0.431	0.420	0.416	0.423	0.412
Mg	0.060	0.063	0.060	0.074	0.071	0.071	0.126	0.130	0.132	0.131	0.128	0.128	0.135	0.130
Ca	0.110	0.115	0.135	0.136	0.119	0.094	0.055	0.038	0.038	0.042	0.039	0.042	0.041	0.050
Sum_cat	7.998	8.002	8.005	8.006	8.005	8.014	8.007	8.015	8.016	8.015	8.018	8.005	8.016	8.010
Alm	72.8	71.7	68.9	68.5	72.7	73.2	80.8	80.4	79.8	79.7	80.2	80.3	79.6	80.0
And	0.0	0.5	0.6	0.0	0.3	2.3	1.9	1.1	1.2	1.4	1.3	0.0	1.4	1.6
Grs	3.6	3.3	3.9	4.5	3.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	0.0
Prp	2.0	2.1	2.0	2.5	2.4	2.4	4.2	4.4	4.5	4.4	4.3	4.3	4.6	4.4
Spe	21.5	22.3	24.6	24.5	21.0	21.3	13.1	13.9	14.4	14.5	14.1	14.0	14.4	13.9

位置	亚东						定结							
	淡色花岗岩						淡色体							
岩性														
测点号	T0512-	T0512	T0512-	T0512-	T0512-	T0512-	T0448-							
	7_3.1	-7_3.2	7_3.3	7_3.4	7_3.5	7_3.6	12A_1.1	12A_1.2	12A_1.3	12A_1.4	12A_1.5	12A_1.6	12A_1.7	12A_1.8
SiO ₂	37.13	36.91	37.08	37.28	37.00	37.04	37.63	37.36	37.36	37.38	37.57	37.4	37.35	37.46
TiO ₂	0.00	0.07	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	0.1	0	0	0.01	0	0.04	0.02
Al ₂ O ₃	20.87	20.95	20.93	20.87	20.58	20.96	21.56	21.21	21.32	21.76	21.68	21.92	21.45	21.66
FeO	34.84	35.03	35.76	35.61	34.88	34.69	28.06	28	27.74	27.61	27.37	27.39	27.98	27.57
MnO	6.50	6.21	5.88	5.86	6.23	6.56	6.73	6.51	6.84	6.52	6.92	6.78	6.91	6.45
MgO	0.94	1.01	1.13	1.12	1.05	0.99	5.03	4.76	4.75	4.45	4.66	4.68	4.61	4.69
CaO	0.69	0.56	0.40	0.43	0.62	0.55	0.57	0.79	0.93	1.28	1.23	1.2	1.14	1.11
Na ₂ O	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05	0.04	0	0.02	0.06	0	0.04	0	0.04	0.02
K ₂ O	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0	0	0.03	0	0	0	0	0
Cr ₂ O ₃	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0.05
NiO	0.00	0.00	0.04	0.00	0.07	0.04	0.03	0	0	0	0	0	0	0
总量	101.0	100.9	101.3	101.2	100.5	100.9	99.7	98.8	99.0	99.0	99.5	99.4	99.5	99.0
O. N.	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
TSi	3.010	2.996	3.002	3.014	3.017	3.003	2.990	2.999	2.995	2.982	2.987	2.972	2.984	2.986

续表 1
Continued Table 1

位置	亚东						定结							
岩性	淡色花岗岩						淡色体							
测点号	T0512-7_3.1	T0512-7_3.2	T0512-7_3.3	T0512-7_3.4	T0512-7_3.5	T0512-7_3.6	T0448-12A_1.1	T0448-12A_1.2	T0448-12A_1.3	T0448-12A_1.4	T0448-12A_1.5	T0448-12A_1.6	T0448-12A_1.7	T0448-12A_1.8
TAl	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.001	0.005	0.018	0.013	0.028	0.016	0.014
Al vi	1.995	2.002	1.997	1.990	1.978	2.005	2.012	2.009	2.012	2.036	2.025	2.032	2.007	2.028
Ti	0.000	0.004	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003	0.006	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.001
Cr	0.000	0.004	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.003
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	2.369	2.391	2.422	2.414	2.375	2.366	1.886	1.900	1.876	1.889	1.854	1.863	1.882	1.881
Mn	0.446	0.427	0.403	0.401	0.430	0.451	0.453	0.443	0.464	0.441	0.466	0.456	0.468	0.435
Mg	0.114	0.122	0.136	0.135	0.128	0.120	0.596	0.570	0.568	0.529	0.552	0.554	0.549	0.557
Ca	0.060	0.049	0.035	0.037	0.054	0.048	0.049	0.068	0.080	0.109	0.105	0.102	0.098	0.095
Sum_cat	7.994	7.998	7.999	7.992	7.992	7.996	8.001	7.995	8.000	8.004	8.002	8.009	8.005	8.001
Alm	79.3	80.0	80.8	80.8	79.4	79.3	63.2	63.8	62.8	63.6	62.3	62.6	62.7	63.4
And	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Grs	2.0	1.4	1.1	1.2	1.7	1.6	1.6	2.3	2.7	3.7	3.5	3.4	3.3	3.0
Prp	3.8	4.1	4.6	4.5	4.3	4.0	20.0	19.1	19.0	17.8	18.6	18.7	18.4	18.8
Spe	14.9	14.3	13.5	13.5	14.5	15.1	15.2	14.9	15.5	14.8	15.7	15.4	15.7	14.7

位置	定结														
岩性	淡色体														
测点号	T0448-12A_1.9	T0448-12A_1.10	T0448-12A_1.11	T0448-12A_1.12	T0448-12A_1.13	T0448-12A_1.14	T0448-12A_1.15	T0448-12A_1.16	T0448-12A_1.17	T0448-12A_1.18	T0448-12A_1.19	T0448-12A_1.20	T0448-12A_1.21	T0448-12A_1.22	T0448-12A_1.23
SiO ₂	37.43	37.42	37.3	37.48	37.44	37.39	37.46	37.29	37.37	37.42	37.7	37.32	37.25	37.42	37.2
TiO ₂	0	0	0.01	0.02	0.04	0.04	0	0	0.01	0.04	0	0.03	0	0.07	0.03
Al ₂ O ₃	21.88	21.69	21.71	21.68	21.53	21.52	21.48	21.92	21.62	21.53	21.79	21.46	21.57	21.13	21.22
FeO	27.49	27.54	27.84	27.85	28	27.99	28.05	28.19	28.16	27.77	28.16	28.34	27.96	27.95	27.76
MnO	6.76	6.92	6.6	6.94	6.52	6.87	6.62	6.16	6.63	6.87	6.84	6.81	6.9	6.83	6.77
MgO	4.55	4.69	4.62	4.8	4.93	4.84	4.83	4.78	4.52	4.87	4.74	4.86	4.91	4.85	4.72
CaO	1.06	1.05	1.1	0.8	0.67	0.72	0.79	0.72	0.88	0.81	0.81	0.73	0.58	0.82	0.64
Na ₂ O	0.01	0.04	0	0.01	0.01	0.03	0	0.01	0	0	0.04	0	0.01	0.02	0
K ₂ O	0.01	0	0.01	0	0.04	0	0	0	0.03	0	0.02	0.02	0	0.02	0
Cr ₂ O ₃	0	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0.03	0	0
NiO	0	0.12	0	0.02	0	0	0.02	0	0.03	0	0.05	0.03	0	0	0.1
总量	99.2	99.5	99.2	99.6	99.2	99.4	99.3	99.1	99.3	99.3	100.2	99.6	99.2	99.1	98.4
O. N.	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
TSi	2.978	2.980	2.977	2.981	2.988	2.984	2.991	2.970	2.984	2.985	2.984	2.981	2.978	3.001	2.996
TAl	0.022	0.020	0.023	0.019	0.012	0.016	0.009	0.030	0.016	0.015	0.016	0.019	0.022	0.000	0.004
Al vi	2.039	2.021	2.025	2.019	2.018	2.012	2.016	2.037	2.025	2.014	2.022	2.003	2.014	1.998	2.014
Ti	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.002	0.000	0.004	0.002
Cr	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	1.880	1.863	1.892	1.879	1.896	1.888	1.894	1.927	1.914	1.874	1.893	1.899	1.891	1.879	1.892
Mn	0.456	0.467	0.446	0.468	0.441	0.464	0.448	0.416	0.448	0.464	0.459	0.461	0.467	0.464	0.462
Mg	0.540	0.557	0.550	0.569	0.587	0.576	0.575	0.568	0.538	0.579	0.559	0.579	0.585	0.580	0.567
Ca	0.090	0.090	0.094	0.068	0.057	0.062	0.068	0.061	0.075	0.069	0.069	0.062	0.050	0.070	0.055
Sum_cat	8.005	8.006	8.007	8.005	8.001	8.004	8.002	8.009	8.004	8.003	8.004	8.008	8.008	7.997	7.998
Alm	63.4	62.6	63.4	62.9	63.6	63.1	63.5	64.8	64.3	62.7	63.5	63.0	63.0	62.8	63.6
And	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Grs	3.0	3.0	3.2	2.3	1.9	2.1	2.2	2.1	2.5	2.3	2.3	2.1	1.6	2.4	1.9
Prp	18.2	18.7	18.5	19.1	19.7	19.3	19.3	19.1	18.1	19.4	18.8	19.4	19.6	19.4	19.0
Spe	15.4	15.7	15.0	15.7	14.8	15.6	15.0	14.0	15.1	15.6	15.4	15.5	15.7	15.5	15.5

注:石榴石端元:铁铝榴石-Alm; 钙铁榴石-And; 钙铝石榴石-Grs; 镁铝石榴石-Prp; 镁铝石榴石-Spe

表2 喜马拉雅造山带中不同地区淡色花岗岩类中石榴石的微量元素地球化学特征($\times 10^{-6}$)Table 2 Trace element composition of garnets in leucogranites and metapelite-hosted leucosome from different areas along Himalayan Orogenic Belt ($\times 10^{-6}$)

位置 岩性	雅拉香波										珠峰				
	淡色花岗岩										淡色花岗岩				
测点号	T0394 -20 _1.1	T0394 -20 _1.2	T0394 -20 _1.3	T0394 -20 _1.4	T0394 -20 _1.5	T0394 -20 _1.6	T0394 -20 _1.7	T0394 -20 _1.8	T0394 -20 _1.9	T0394 -20 _1.10	TZF -01 _1.1	TZF -01 _1.2	TZF -01 _1.3	TZF -01 _1.4	TZF -01 _1.5
La	<	0.011	0.093	0.011	0.01	0.024	0.024	0.02	0.01	0.016	0.003	0.004	0.001	0.004	
Ce	<	0.007	0.1	0.02	0.015	<	0.081	0.012	0.037	0.032	0.003	0.005	0.013	0.018	0.002
Pr	0.01	0.007	0.005	0.005	<	<	0.037	0.007	0.005	0.007	0.001	0.001	0.004	0.019	0.006
Nd	<	<	0.063	<	0.114	0.033	0.178	0.169	0.083	<	0.090	0.003	0.183	0.168	0.023
Sm	2.712	1.444	1.255	2.32	1.828	2.865	2.908	1.954	2.087	1.376	0.486	0.539	0.537	0.835	0.463
Eu	0.111	0.047	0.011	0.048	0.057	0.045	0.051	0.047	0.068	0.033	0.011	0.010	0.002	0.023	0.010
Gd	64.15	24.52	23.62	56.96	41.08	57.35	57.08	48.32	58.52	22.57	6.434	4.096	5.778	7.630	5.537
Tb	30.98	16.41	17.33	28.48	21.79	32.29	29.3	25.54	30.91	16.09	4.692	3.487	4.590	6.763	4.831
Dy	405.2	256.5	260.2	383.5	284.1	393.6	375.8	348.9	411.8	264.1	68.87	52.95	76.28	113.2	77.86
Ho	120.4	73.97	77.23	119.8	77.82	99.32	102.9	105.5	125	94.19	22.90	17.39	24.44	41.71	24.32
Er	432	254.6	275.1	471.5	281.6	329.7	360.7	399.4	463.2	420.9	103.0	82.77	119.0	228.0	112.3
Tm	74.65	42.71	46.08	86.78	51.77	54.63	64.42	74.16	82.47	83.96	22.89	19.98	29.94	68.52	27.07
Yb	517.7	286.3	301.3	618.9	379.3	361.6	442.2	543.3	584.5	594.6	199.0	188.2	284.8	756.5	251.4
Lu	72.81	32.88	35.42	86.14	48.13	46.42	57.85	76.3	80.38	82.04	32.02	32.66	44.35	136.9	36.44
ΣREE	1721	989.4	1038	1855	1188	1378	1494	1624	1839	1580	460.4	402.1	589.9	1360	540.3
Eu/Eu*	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
(Gd/Yb) _N	0.12	0.09	0.08	0.09	0.11	0.16	0.13	0.09	0.10	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02
V	5.938	2.654	2.149	5.746	4.671	2.322	5.752	7.654	7.531	2.657	0.20	0.14	0.15	0.01	0.11
Sc	97.23	126.5	103.2	94.74	98.32	80.42	92.4	90.58	106.9	104.3	117.7	130.6	123.9	161.6	119.6
Co	0.958	0.873	0.873	0.932	0.908	1.048	1.118	0.929	0.866	0.826	1.771	1.867	1.698	1.824	1.710
Ni	<	<	1.105	3.342	0.901	1.087	<	1.325	<	<	13.034	<	4.414	<	<
Cu	0.963	1.647	2.595	1.608	1.689	<	0.918	0.482	3.134	1.223	0.861	<	0.768	<	<
Zn	290.1	316.6	319.9	301.4	298.9	301.2	306.6	286.1	305	321.8	260.0	264.9	258.4	255.7	248.7
Rb	0.614	0.373	0.401	0.575	0.661	0.474	0.437	0.535	0.646	0.739	<	<	0.024	0.003	<
Sr	0.325	0.194	0.552	0.289	0.262	0.187	0.153	0.231	0.251	0.521	0.040	<	0.130	<	<
Y	3264	2403	2375	3370	2409	2977	3032	2947	3532	2723	524.5	444.3	713.1	1248	716.6
Zr	4.901	0.367	0.812	3.957	2.536	5.385	2.986	1.306	2.258	0.884	5.274	6.062	7.832	0.469	8.323
Nb	0.706	0.024	0.002	0.76	2.079	0.062	3.628	0.416	0.605	0.021	0.008	1.662	0.008	0.048	0.004
Cs	0.04	0.002	0.04	0.025	0.122	0.007	0	0.045	0.024	0.118	0.017	<	<	<	<
Ba	0.031	<	0.607	0.253	0.623	0.136	0.132	<	0.278	<	0.164	0.078	<	0.215	0.023
Hf	0.138	0.006	0.005	0.137	0.206	0.244	0.226	0.079	0.107	0.019	0.119	0.089	0.182	0.012	0.131
Ta	0.429	0.017	0.023	0.294	2.086	0.329	3.558	0.343	0.287	0.015	0.004	0.083	0.043	0.164	0.045
Pb	0.162	0.003	0.532	0.041	0.135	0.062	0.015	0.09	0.162	1.14	<	0.014	0.012	1.103	0.040
Th	0.01	0	0.024	0	0.006	0.003	0.01	0.01	0.005	0.004	0.000	0.001	0.002	0.672	0.002
U	0.031	0.002	0.008	0.021	0.031	0.018	0.046	0.01	0.035	0.009	0.009	0.011	0.007	2.290	0.008
Y/Yb	6.30	8.39	7.88	5.45	6.35	8.23	6.86	5.42	6.04	4.58	2.64	2.36	2.50	1.65	2.85
Lu/Hf	528	5480	7084	629	234	190	256	966	751	4318	269	369	244	11032	279
Nb/Ta	1.65	1.41	0.09	2.59	1.00	0.19	1.02	1.21	2.11	1.40	2.15	19.98	0.19	0.29	0.08
Zr/Hf	35.5	61.2	162	28.9	12.3	22.1	13.2	16.5	21.1	46.5	44.3	68.5	43.1	37.8	63.6
Sm/Nd			19.9		16.0	86.8	16.3	11.6	25.1		5.39	189	2.94	4.98	20.1

续表 2

Continued Table 2

位置	珠峰											亚东			
岩性	淡色花岗岩											淡色花岗岩			
测点号	TZF -01 _1.6	TZF -01 _1.7	TZF -01 _1.8	TZF -01 _1.9	TZF -01 _1.10	TZF -01 _1.11	TZF -01 _1.12	TZF -01 _1.13	TZF -01 _1.14	TZF -01 _1.15	TZF -01 _1.16	T0512 -07 _4.1	T0512 -07 _4.2	T0512 -07 _4.3	T0512 -07 _4.4
La	0.003	0.001	<	0.003	0.000	0.006	<	<	<	0.007	0.008	0.006	0.005	0.007	0.035
Ce	<	<	<	<	0.008	0.009	0.009	<	0.003	0.005	<	0.007	0.037	0.025	0.071
Pr	0.003	0.005	0.012	0.010	0.008	0.009	0.012	0.004	0.005	0.000	0.000	0.002	0.003	0.004	0.014
Nd	0.111	0.188	0.069	0.102	0.193	0.189	0.096	0.132	0.029	0.009	0.057	0.01	0.07	0.141	0.103
Sm	0.663	0.416	0.499	0.426	1.197	1.290	1.232	0.785	0.477	0.588	0.349	0.332	2.363	3.013	0.782
Eu	0.011	0.017	0.026	0.022	0.018	0.030	0.004	0.018	0.028	0.036	0.007	0.003	0.165	0.112	0.027
Gd	5.035	6.430	5.897	6.710	10.867	12.523	11.023	6.240	8.284	8.473	5.944	3.885	37.92	38.57	17.57
Tb	4.093	4.880	4.124	4.790	7.124	7.731	7.538	4.566	5.821	5.845	3.859	2.631	21.67	26.62	16.14
Dy	58.22	70.44	60.92	70.23	101.5	110.9	106.3	66.93	83.94	82.61	60.38	40.72	237.9	316.6	255.9
Ho	16.22	20.80	16.56	21.54	30.92	32.27	31.82	21.29	25.31	24.72	20.07	13.37	52.53	66.81	77.18
Er	70.35	84.39	64.34	91.79	122.2	127.7	124.7	89.16	106.3	100.9	93.50	54.21	157.0	197.1	316.8
Tm	15.78	17.67	14.25	19.50	24.69	26.22	25.10	18.91	22.03	20.83	21.00	10.17	24.48	30.32	66.69
Yb	138.9	149.1	123.3	168.3	193.2	205.4	196.1	156.0	186.8	176.0	193.1	85.38	173.7	208.2	575.3
Lu	20.46	21.43	16.02	23.81	26.34	28.55	26.70	21.68	28.84	26.02	32.75	12.30	21.70	23.02	82.94
ΣREE	329.8	375.8	306.0	407.3	518.3	552.8	530.7	385.7	467.9	446.0	431.0	223.0	729.5	910.5	1410
Eu/Eu*	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01
(Gd/Yb) _N	0.04	0.04	0.05	0.04	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.22	0.19	0.03
V	0.17	0.19	0.11	0.20	0.19	0.20	0.19	0.20	0.19	0.15	0.20	2.693	2.668	0.448	0.463
Sc	133.7	113.2	116.5	119.7	205.8	215.9	214.4	175.7	130.7	124.1	138.4	165.7	48.61	34.71	37.88
Co	1.903	1.822	1.724	1.904	1.783	1.754	1.530	1.647	1.706	1.454	1.827	6.19	7.456	7.653	7.611
Ni	6.571	<	<	2.189	2.907	0.445	0.681	7.846	2.667	<	<	0	1.202	0	2.159
Cu	0.114	1.407	1.749	<	<	<	0.406	<	<	0.257	0.083	0	0.004	0	0.351
Zn	257.6	227.3	253.4	249.9	205.1	192.8	190.3	232.8	243.7	238.0	242.6	159.3	155.0	152.1	157.2
Rb	0.017	<	0.019	<	0.029	0.026	<	0.024	<	<	0.027	0.056	0.231	0.288	0.463
Sr	0.001	0.053	0.067	<	<	0.030	0.000	<	0.061	0.031	<	0.067	0.308	0.316	0.441
Y	475.5	508.7	509.6	525.4	961.8	1010	984.9	626.5	593.9	599.8	486.8	359.0	1922	2543	2649
Zr	4.940	7.304	1.472	4.286	2.224	1.868	1.113	2.961	7.316	8.695	3.782	2.352	2.205	5.433	7.368
Nb	0.014	0.008	0.001	0.000	0.012	0.001	0.008	0.006	0.003	<	<	0.01	0.051	2.472	71.03
Cs	0.016	<	0.002	0.007	0.003	0.011	0.014	<	<	0.001	0.003	0	0.036	0	0.041
Ba	<	0.106	<	0.001	<	<	<	0.018	<	<	0.167	0	0.605	0.71	0.56
Hf	0.146	0.166	0.092	0.148	0.048	0.106	0.015	0.065	0.140	0.154	0.183	0.106	0.091	0.301	0.543
Ta	0.054	0.010	0.022	<	0.004	0.009	0.006	<	0.004	0.012	0.003	0.004	0.112	2.494	10.93
Pb	<	0.004	0.020	0.024	0.023	<	0.012	0.009	<	0.023	0.025	0.033	0.016	0.025	0.07
Th	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002	0.002	<	0.000	0.000	<	0.001	0	0.002	0	1.13
U	0.002	0.003	0.002	0.006	0.012	0.017	0.023	0.008	0.005	0.011	0.002	0.005	0.002	0.022	3.228
Y/Yb	3.42	3.41	4.13	3.12	4.98	4.92	5.02	4.02	3.18	3.41	2.52	4.20	11.07	12.21	4.60
Lu/Hf	140	129	175	161	554	270	1829	332	205	169	179	116	239	76.5	153
Nb/Ta	0.26	0.81	0.03		2.61	0.08	1.31		0.73	0.00	0.00	2.50	0.46	0.99	6.50
Zr/Hf	33.9	44.1	16.1	29.0	46.8	17.6	76.2	45.4	52.1	56.4	20.7	22.2	24.2	18.1	13.6
Sm/Nd	5.95	2.21	7.18	4.17	6.21	6.83	12.8	5.93	16.4	66.3	6.10	33.2	33.8	21.4	7.59

续表 2

Continued Table 2

位置	亚东								定结					
	淡色花岗岩								淡色体					
岩性														
测点号	T0512 -07 _4.5	T0512 -07 _4.6	T0512 -07 _4.7	T0512 -07 _4.8	T0448 -12A _1.1	T0448 -12A _1.2	T0448 -12A _1.3	T0448 -12A _1.4	T0448 -12A _1.5	T0448 -12A _1.6	T0448 -12A _1.7	T0448 -12A _1.8	T0448 -12A _1.9	T0448 -12A _1.10
La	0.032	0.017	0.008	0.005	0.033	0.045	0.013	0.075	0.113	0.012	<	0.002	0.719	0.006
Ce	0.221	0.051	0.048	0.009	0.065	0.199	0.053	0.213	0.33	<	0.011	0.039	2.314	0.052
Pr	0.015	0.003	0	0.011	0.028	0.021	0.011	0.023	0.004	0.019	0.005	0.018	0.502	0.01
Nd	0.152	0.115	0.012	0.045	0.671	0.299	0.381	0.378	0.428	0.387	0.332	0.522	4.721	0.52
Sm	1.773	2.012	0.556	0.254	3.725	2.586	2.07	1.868	2	3.18	3.005	3.383	7.6	4.561
Eu	0.04	0.058	0.039	0.012	<	0.04	0.004	0.042	0.007	0.027	0.043	0.04	<	0.037
Gd	29.78	32.05	7.394	2.748	19.7	13.79	7.38	8.203	9.07	13.87	12.85	15.45	14.73	20.58
Tb	24.32	20.07	5.861	2.158	6.293	4.698	2.338	2.687	3.118	4.908	4.623	6.122	4.053	6.951
Dy	329.7	230.8	87.59	34.02	52	41.01	24.45	27.37	28.34	38.37	37.06	49.45	28.74	51.72
Ho	80.47	47.84	25.73	11.53	9.274	8.747	5.094	5.558	4.633	5.259	4.485	5.835	4.018	6.531
Er	277.1	148.6	90.21	49.02	25.92	24.53	17.6	19.86	14.21	13.41	12.28	12.21	10.55	15.28
Tm	51.07	25.17	15.6	9.534	4.413	4.435	3.388	3.227	2.85	2.57	2.199	1.713	1.898	2.452
Yb	410.8	188.8	118.1	79.94	31.47	31.39	24.92	26.44	21.07	20.06	17.87	10.28	15.26	17.22
Lu	55.79	23.03	15.06	11.88	4.133	4.104	3.131	3.241	2.464	2.452	2.017	1.02	1.711	1.734
ΣREE	1261	718.6	366.2	201.2	157.7	135.9	90.83	99.19	88.64	104.52	96.78	106.1	96.82	127.7
Eu/Eu*	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
(Gd/Yb) _N	0.07	0.17	0.06	0.03	0.63	0.44	0.30	0.31	0.43	0.69	0.72	1.50	0.97	1.20
V	0.214	0.73	1.984	3.126	11.47	16.13	16.2	16.78	16.9	13.67	13.3	12.64	9.291	6.891
Sc	35.84	47.65	111.3	192.5	56.21	45.66	23.79	25.03	27.27	38.31	34.49	37.16	29.34	46.34
Co	7.648	7.723	6.955	6.35	39.92	39.68	41.32	39.61	41.22	41.18	41.03	40.45	38.64	41.18
Ni	1.99	3.388	5.816	0.566	<	<	0.776	<	0.993	1.458	4.746	12.94	1.113	7.628
Cu	0	0.033	0	0.424	<	0.399	0.632	6.416	8.468	0.039	<	0.221	0.109	<
Zn	160.7	154.8	155.7	163.8	173.4	229.8	285.2	280.5	311.9	308.6	308.3	307	305.7	310.8
Rb	0.365	0.176	0.181	0.002	1.385	0.674	0.659	3.943	1.587	0.073	<	<	67.39	5.372
Sr	0.455	0.311	0.304	0.299	0.925	0.371	0.515	1.404	0.383	0.172	0.014	0.083	0.398	<
Y	3002	1936	718	315.4	261	227.8	155.1	159.4	153.2	181.5	164.9	218.5	135.6	230.2
Zr	9.165	4.449	1.377	2.957	10.74	6.525	4.895	4.901	6.042	3.627	4.064	3.561	11.71	7.713
Nb	19.4	7.216	0.01	0.035	0.01	0.004	0.012	0.03	0.01	<	<	0.009	1.949	0.031
Cs	0.014	0.371	0.016	0	0.027	<	<	0.221	0.097	<	<	0	4.802	0.591
Ba	0.582	0.59	0.642	0.315	3.339	1.862	1.824	3.616	1.202	0.238	0.146	0.001	1.038	<
Hf	0.664	0.295	0.035	0.145	0.414	0.158	0.155	0.206	0.179	0.102	0.143	0.161	0.492	0.176
Ta	7.998	2.45	0.013	0	<	0.011	<	<	<	0.007	<	0.014	0.575	0.04
Pb	0.075	0.059	0.072	0.031	0.314	0.316	0.266	1.293	0.629	0.094	0.033	0.086	0.361	0.007
Th	0.095	0.003	0	0	0.018	0.204	0.007	0.115	0.368	0	0.002	0	0.612	0.016
U	0.209	0.012	0.002	0.008	0.087	0.063	0.01	0.027	0.121	0.026	0.022	0.056	6.058	0.122
Y/Yb	7.31	10.3	6.08	3.95	8.29	7.26	6.22	6.03	7.27	9.05	9.23	21.3	8.89	13.4
Lu/Hf	84.0	78.1	430	81.9	9.98	26.0	20.2	15.7	13.8	24.0	14.1	6.34	3.48	9.85
Nb/Ta	2.43	2.95	0.77			0.36				0.00		0.64	3.39	0.78
Zr/Hf	13.8	15.1	39.3	20.4	25.9	41.3	31.6	23.8	33.8	35.6	28.4	22.1	23.8	43.8
Sm/Nd	11.7	17.5	46.3	5.64	5.55	8.65	5.43	4.94	4.67	8.22	9.05	6.48	1.61	8.77

续表 2

Continued Table 2

位置	定结													
	淡色体													
岩性														
测点号	T0448 -12A _1.11	T0448 -12A _1.12	T0448 -12A _1.13	T0448 -12A _1.14	T0448 -12A _1.15	T0448 -12A _1.16	T0448 -12A _1.17	T0448 -12A _1.18	T0448 -12A _1.19	T0448 -12A _1.20	T0448 -12A _1.21	T0448 -12A _1.22	T0448 -12A _1.23	T0448 -12A _1.24
La	0.003	0.006	0.01	0.001	0.014	0.005	<	0.05	0.03	<	<	0.011	0.003	<
Ce	0.028	<	0.011	0.024	0.017	0.009	<	0.155	0.135	0.091	0.021	0.031	<	<
Pr	<	0.014	<	0.016	0.011	0.014	0.018	0.031	0.012	0.031	0.014	<	0	0
Nd	0.438	0.348	0.47	0.186	0.313	0.376	0.317	0.477	0.365	0.736	0.32	0.328	0.295	0.461
Sm	3.545	3.453	3.66	2.38	1.571	1.398	1.17	1.671	2.282	2.346	1.909	1.698	1.796	2.531
Eu	0.014	<	0.039	0.012	0.025	<	0.006	0.019	0.03	<	0.025	<	<	0.022
Gd	17.21	15.65	16.03	7.827	6.869	6.716	7.232	7.12	12.4	11.11	8.273	6.841	9.674	15.06
Tb	5.556	5.226	5.013	2.442	2.34	3.048	3.021	2.898	4.996	4.46	3.137	2.595	3.186	4.958
Dy	39.98	36.28	30.54	10.02	12.21	20.05	22.27	19.87	39.6	35.57	27.62	22.12	28.87	44.31
Ho	5.466	5.148	3.513	0.667	1.072	1.842	2.304	1.816	4.619	5.147	4.265	4.258	5.93	7.859
Er	14.36	12.71	7.075	0.886	1.62	3.547	4.196	3.356	9.456	14.6	13.01	14.12	20.55	23.35
Tm	2.368	2.25	1.103	0.076	0.17	0.395	0.478	0.416	1.814	2.72	2.39	2.801	3.892	3.752
Yb	17.98	16.84	8.213	0.38	1.139	2.347	2.599	2.39	12.39	22.64	19.55	23.89	29.5	27.26
Lu	2.058	2.037	0.951	0.04	0.118	0.245	0.253	0.218	1.367	3.003	2.269	2.709	3.582	3.56
ΣREE	109.0	99.96	76.63	24.96	27.49	39.99	43.86	40.49	89.50	102.5	82.80	81.40	107.3	133.1
Eu/Eu*	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
(Gd/Yb) _N	0.96	0.93	1.95	20.60	6.03	2.86	2.78	2.98	1.00	0.49	0.42	0.29	0.33	0.55
V	7.61	6.427	4.315	0.842	0.368	0.071	0.147	0.01	<	0.007	2.455	7.427	8.761	11.13
Sc	35.57	32.78	28.01	15.08	13.06	12.19	11.89	13.18	25.83	27.88	34.32	31.92	37.35	50.86
Co	40.7	40.91	42.68	40.92	40.26	39.34	40.24	40.32	40.89	39.21	40.23	41.37	39.97	41.18
Ni	0.786	<	<	<	5.102	11.17	<	8.823	8.452	4.881	12.11	1.985	4.296	0.275
Cu	<	<	0.925	<	0.418	0.514	0.373	<	1.014	<	0.326	<	<	0.322
Zn	305	307.9	304.6	309.2	314.7	304	307	312	338.2	298.9	307.1	305.1	299.5	303.7
Rb	0.417	0.35	0.37	0.099	<	<	0.105	0.002	0.012	0.099	<	<	0.129	0.184
Sr	0	0.08	<	0.04	<	0.092	<	0.032	0.141	0.111	<	0.026	<	0.158
Y	188.3	170.6	126.6	31.89	44.85	82	94.66	81.65	173.5	179.4	160	146.5	186.4	246.6
Zr	6.25	5.684	5.299	6.865	8.275	7.732	7.686	7.724	4.949	4.119	5.427	4.577	5.304	10.38
Nb	0.02	0.008	<	0.015	0.084	0.145	0.12	0.219	0.026	0.035	0.026	<	0.006	0.021
Cs	<	0.015	0.057	<	<	<	0.037	0.067	<	0.066	<	0.029	<	0.024
Ba	0.066	0.002	0.323	0.059	0.28	0.237	<	<	0.263	0.113	<	0.029	0.03	<
Hf	0.125	0.12	0.088	0.45	0.331	0.509	0.555	0.343	0.146	0.138	0.183	0.154	0.136	0.332
Ta	0.013	0.008	<	0.091	0.359	0.502	0.516	0.979	0.143	0.031	<	0.007	<	<
Pb	0.002	0.037	<	0.057	0.068	<	0.006	0.038	0.001	0.077	0.108	0.055	0.032	0.05
Th	0	0.007	0.016	0	0	<	0	0.053	0.118	0.005	0	0	0	0.008
U	0.076	0.101	0.042	0.04	0.013	0.026	0.046	0.094	0.043	0.068	0.019	0.025	0.011	0.066
Y/Yb	10.5	10.1	15.4	83.9	39.4	34.9	36.4	34.2	14.0	7.92	8.18	6.13	6.32	9.05
Lu/Hf	16.5	17.0	10.8	0.09	0.36	0.48	0.46	0.64	9.36	21.8	12.4	17.6	26.3	10.7
Nb/Ta	1.54	1.00		0.16	0.23	0.29	0.23	0.22	0.18	1.13				
Zr/Hf	50.0	47.4	60.2	15.3	25.0	15.2	13.9	22.5	33.9	29.9	29.7	29.7	39.0	31.3
Sm/Nd	8.09	9.92	7.79	12.8	5.02	3.72	3.69	3.50	6.25	3.19	5.97	5.18	6.09	5.49

3 地球化学特征

为了限定这些石榴石的化学成分变化特征,分别从淡色花岗岩 T0394-20、TZF-1、T0512-7 和淡色体 T0448-12A 中选择了 3~4 颗粒度较大、具有代表性石榴石为研究对象,确定它们的主量元素和微量元素地球化学组成。测试结果表明,在同一件样品中,不同石榴石表现出相似的地球化学特征。在下述讨论中,限于篇幅和为了讨论的简洁,在每一件样品中选择 1 颗石榴石,阐述它们的矿物化学组成,厘定它们之间的共性和差异性,探讨蕴含的岩石学和地球化学意义。主要结果见表 1、表 2。

3.1 石榴石的地球化学特征

3.1.1 主量元素特征

从测试结果来看,来自淡色花岗岩的 3 颗石榴石具有一致的主量元素组成特征,淡色体中的石榴石具有明显不同的成分特征(图 3)。与淡色花岗岩中的石榴石相比,淡色体中的石榴石明显贫 Fe,但富 Mg。在淡色花岗岩中,石榴石的 FeO 较高,但 MgO 较低,分别为 30.0%~36.3% 和 <1.5%;在淡色体中,石榴石的 FeO 明显降低(<29.0%)但 MgO 显著升高(4.4%~5.8%)。但在所有石榴石中,Mn 和 Ca 浓度相差不大,分别为 5.7%~10.6% 和 0.4%~1.5%。在淡色花岗岩和淡色体中,石榴石的端元组成分别为 $Alm_{69-81}Grs_{0-5}Prp_{2-5}Spe_{13-25}$ 和 $Alm_{62-65}Grs_{2-4}Prp_{18-20}Spe_{14-16}$ 。

从端元成分剖面图来看(图 4),淡色花岗岩中的石榴石显示了明显的成分环带,而淡色体中的石榴石无环带。在雅拉香波淡色花岗岩 T0394-20 中,从核部到边部,石榴石的铁铝榴石组分(Alm)升高,锰铝榴石组分(Spe)降低,两者之间呈镜像关系,镁铝榴石组分(Prp)略升高,显示了典型的生长环带的特征(图 4a)。在珠峰淡色花岗岩 TZF-1 中,从核部到边部,石榴石的 Alm 先升高后降低,Spe 先降低后略升高,

Prp 变化不明显。石榴石中的 Alm 和 Spe 组分也呈镜像关系。但与样品 T0394-20 中的石榴石相比,该样品中的石榴石粒度普遍较大,记录了更加丰富的“振荡型”生长过程的信息(图 4b)。在亚东淡色花岗岩 T0512-7 中,石榴石粒度较小,从核部到边部,Spe 和 Grs 升高,Alm 和 Prp 降低(图 4c),记录了与前两件样品不一样的岩浆演化过程。有趣的是,在定结地区淡色体 T0448-12A 中,从核部到边部,Alm 和 Prp 呈锯齿状变化,但两者之间呈镜像关系,而 Grs 和 Spe 变化幅度较小且无规律(图 4d),与许多变泥质岩中的石榴石成分环带类似,为淡色体在熔体分离中携带的源岩变质成因的石榴石。

3.1.2 微量元素特征

为了查明这两类石榴石微量元素特征的差异,使用 LA-ICP-MS 对典型石榴石进行了微量元素成分剖面的原位测试(表 2)。虽然通过显微照片和 BSE 图像等观察,在测试中,尽量地避开包裹体区域,进行原位 LA-ICP-MS 测试,但个别点还是可能包含微米级包裹体,因此,首先对数据进行了细致的分析,鉴别出明显影响石榴石的 REE、Zr、Hf、Y 等元素的包裹体,再分析石榴石的有效微量元素地球化学特征。测试结果表明:与主量元素一样,这两类石榴石的微量元素特征显著不同。

这两类石榴石都富集 HREE、Y、Zn 和 Sc,而亏损 LREE、V、Zr 和 Hf(表 2)。与淡色花岗岩中石榴石的 Y(359×10^{-6} ~ 3532×10^{-6}),Zn(152×10^{-6} ~ 321×10^{-6})和 Sc(35×10^{-6} ~ 216×10^{-6})的浓度相比,淡色体中石榴石的 Y(< 261×10^{-6})和 Sc(< 56×10^{-6})含量明显降低,而 Zn(> 280×10^{-6})含量增加(图 5)。在 3 件淡色花岗岩中,与主量元素一样,石榴石的微量元素也具有一定的差别。T0394-20 含有最高的 Y(> 2375×10^{-6})和 Sc(> 286×10^{-6}),TZF-1 中 Y(< 1248×10^{-6})最低,在 T0512-7 中,从核部到边部,石榴石的 Y 含量逐渐从 3002×10^{-6} 降低到 315×10^{-6} ,Sc 从 36×10^{-6} 升高到 193×10^{-6} ,Zn 最低(< 164×10^{-6})。淡色花岗

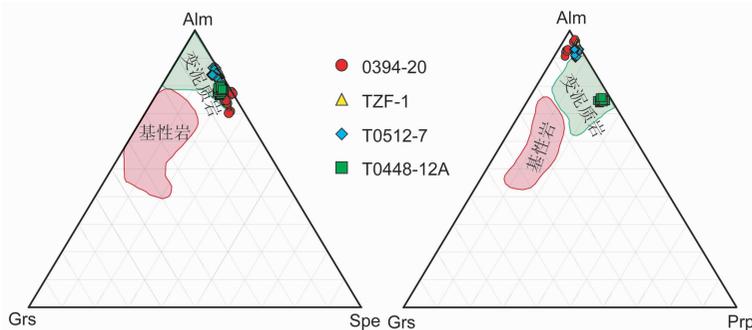


图 3 喜马拉雅造山带内淡色花岗岩和淡色体中石榴石的端元组分图解
变基性岩和变泥质岩中石榴石范围据作者未发表数据

Fig. 3 End-member discrimination diagrams for garnets in leucogranite and metapelite-hosted leucosome along the Himalayan Orogenic Belt

Fields for garnets in metabasite and metapelite are based on our unpublished data

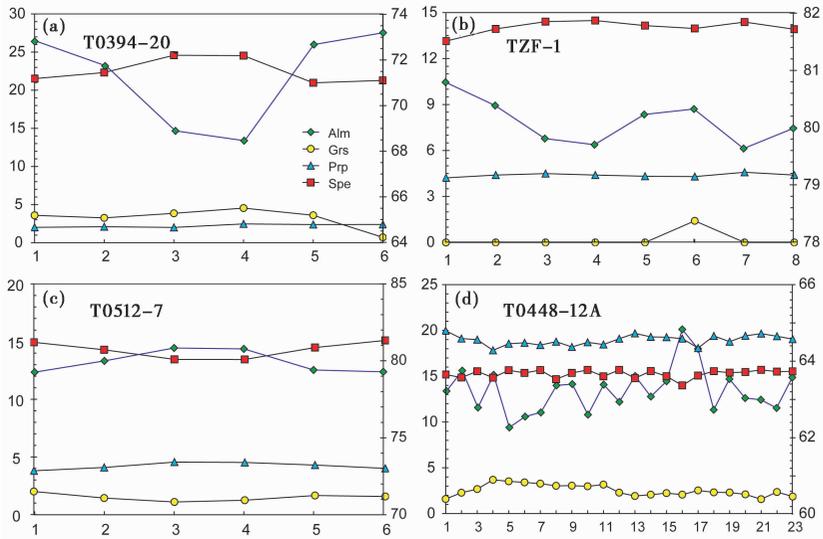


图4 喜马拉雅造山带内不同地区淡色花岗岩中石榴石的端元成分剖面图

(a)-样品 T0394-20 为雅拉香波淡色花岗岩,从核部到边部,Alm 升高,Spe 降低,Prp 略升高,显示了生长环带的特征;(b)-样品 TZF-1 为珠峰淡色花岗岩,从核部到边部,Alm 先升高后降低,Spe 先降低后略升高,Prp 变化不明显,表明此石榴石显示了典型的“振荡型”生长环带的特征;(c)-样品 T0512-7 为亚东淡色花岗岩,从核部到边部,Spe 和 Grs 升高,Alm 和 Prp 降低,显示了不一样的岩浆演化过程;(d)-样品 T0448-12A 为定结地区混合岩中的淡色体,从核部到边部,Alm 呈锯齿状,Grs、Prp 和 Spe 变化幅度较小且无规律,与变泥质岩中石榴石的环带特征相似.矿物代号:Alm-铁铝榴石;Grs-钙铝榴石;Prp-镁铝榴石;Spe-锰铝榴石

Fig. 4 Compositional profile for garnets in leucogranites and metapelite-hosted leucosome from different areas along the Himalayan Orogenic Belt

(a)-sample T0394-20 is a leucogranite from Yardoi area. Garnet show rim-ward increase in almandine (Alm) and pyrope (Prp) components but decrease in spessartine (Spe), indicating a growth zoning; (b)-sample TZF-1 is a leucogranite from Everest area. Garnets show oscillatory growth zoning; (c)-sample T0512-7 is a leucogranite from Yadong area. Garnets show rim-ward increase in Spe and Grossular (Grs) components but decrease in Alm and Prp components, indicating different growth zoning from the other samples; (d)-sample T0448-14A is a leucosome of a migmatitic metapelite from Dinggye area. Garnets show complicate chemical profile similar to those from metapelites

岩中石榴石的 Lu/Hf 比值(77 ~ 7084)高度变化,大大高于淡色体中相应的值(< 26)。在两类石榴石中,Zr/Hf 比值(12 ~ 76)无明显区别。

3.1.3 稀土元素特征

从稀土元素特征来看(表2、图6),这两类石榴石也表现出不一致的特征,都亏损轻稀土(LREE),Eu 为明显的负异常($Eu/Eu^* < 0.02$),但淡色花岗岩中的石榴石富集重稀土(HREE),稀土元素总量为 $201 \times 10^{-6} \sim 1854 \times 10^{-6}$,而淡色体中的石榴石略亏损 HREE,稀土元素总量小于 158×10^{-6} 。在 T0512-7 中,从核部到边部,和 Y 的特征一样,石榴石的 ΣREE 逐渐从 1410×10^{-6} 降低到 201×10^{-6} 。在淡色花岗岩中,从核部到边部,石榴石的 HREE 含量降低(图6b,c)。而淡色体中的石榴石表现出相反的特征(图6d),重稀土元素配分曲线从下滑转到平坦。在 $(Gd/Yb)_N$ -Y/Yb 图解上(图7),所有石榴石都显示 $(Gd/Yb)_N$ 与 Y/Yb 为正相关关系,但淡色花岗岩(趋势 A)和淡色体(趋势 B)中的石榴石具有不同的相关关系。

3.2 花岗岩的地球化学特征

这四件淡色花岗岩在主量元素组成上变化较小(表3),

SiO_2 和 Al_2O_3 含量较高, SiO_2 含量在 67.7% ~ 75.4% 之间, Al_2O_3 大于 14.0%,样品中 A/CNK 比值都大于 1.0,显示过铝质的特征; TiO_2 、FeO、MgO、MnO 和 CaO 含量较低,MnO 含量小于 0.1%。

在微量元素组成上,富 Rb、Ba、Sr 和 Zr,含有少量的 Zn ($5 \times 10^{-6} \sim 105 \times 10^{-6}$)、Sc ($0.3 \times 10^{-6} \sim 1.9 \times 10^{-6}$) 和 Y ($3.3 \times 10^{-6} \sim 51.3 \times 10^{-6}$)。Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值分别为 3.3 ~ 7.6 和 15.4 ~ 30.4,明显小于球粒陨石的相应比值(Na/Ta = 19.9 和 Zr/Hf = 35 ~ 40)。在稀土元素球粒陨石标准化图上(图8),这些花岗岩显示了不一致的特征。T0394-20、T0512-7 和 TZF-1 稍富轻稀土,Eu 为负异常($Eu/Eu^* < 0.4$),重稀土接近平坦(TZF-1 略富集重稀土)。T0448-12A 富集轻稀土,亏损重稀土,Eu 无异常。

4 讨论

上述数据已揭示出不同淡色花岗岩中,石榴石在岩相学形态和元素地球化学特征上的共性和差异。在淡色花岗岩中,石榴石具有相似的形态,即石榴石为半自形到自形(图2

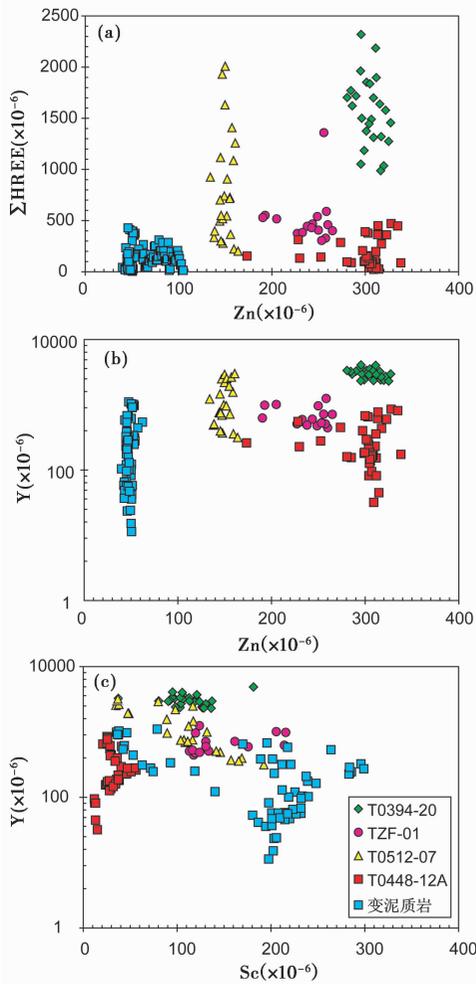


图5 喜马拉雅造山带中不同地区淡色花岗岩类和变泥质岩中石榴石的 Zn- Σ HREE (a)、Zn-Y (b) 和 Sc-Y (c) 协变图
Fig. 5 Co-variation diagram Zn- Σ HREE (a), Zn-Y (b) and Sc-Y (c) for garnets in leucogranites and metapelite-hosted leucosome as well as metapelites from different areas along the Himalayan Orogenic Belt

a-c), 六边形或椭圆形, 几乎不含有包裹体; 但日玛那穹窿泥质混合岩中淡色体 T0448-12A 的石榴石为他形, 边部被溶蚀成港湾状, 含有一定量的包裹体 (图 2d)。从地球化学特征来看, 来自不同地区的淡色花岗岩中石榴石具有一致的主量元素成分, 富 Fe 和 Mn, 而淡色体中的石榴石相对明显贫 Fe 而富 Mg (图 3)。在主量元素成分剖面中, 淡色花岗岩中大部分石榴石都具有类似“振荡型”生长环带的特征 (图 4a, b), 反应了复杂的岩浆演化过程。而淡色体中石榴石的主量元素呈锯齿状变化 (图 4d), 与许多变泥质岩中的石榴石成分环带类似, 为淡色体在熔体分离中携带的源岩变质成因的石榴石。从微量元素特征来看, 这两类石榴石都富集 HREE、Y、Zn 和 Sc, 而亏损 LREE、V、Zr 和 Hf, 但含量稍有区别。与淡色体相比, 淡色花岗岩中石榴石更富 Y 和 Sc, 而贫 Zn (图 5)。在稀土元素配分图上 (图 6), Eu 都显示明显的负

异常, 从核部到边部, 淡色花岗岩中石榴石 HREE 含量降低 (图 6b, c), 而淡色体中石榴石 HREE 含量升高 (图 6d)。在 (Gd/Yb)_N-Y/Yb 图解上 (图 7), 淡色花岗岩和淡色体中的石榴石也显示了不一致的相关性。从以上这些特征可以把喜马拉雅造山带内新生代花岗岩中的石榴石分为两类。

在地壳条件下, 变泥质岩的脱水部分熔融是形成花岗岩岩浆的重要机制 (Brown, 2007)。所形成花岗岩岩浆的尺度包括从混合岩中的亚厘米级到花岗岩岩基的公里级 (Stevens *et al.*, 2007), 跨越近 6 个数量级。石榴石作为变泥质岩的主要造岩矿物, 难熔且易于保留复杂的化学成分环带 (主量元素和微量元素) 和不同类型的流体或矿物包裹体, 记录了控制石榴石结晶的变质反应的关键信息 (Chernoff and Carlson, 1999), 是反演变质反应 *P-T* 条件的重要指示矿物 (Ganguly *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2000; Kohn, 2003; Pandey *et al.*, 2010), 易被熔体携带且发生反应, 称为混染型石榴石; 在一定条件下, 石榴石可以从部分熔融产生的花岗岩熔体中结晶, 形成岩浆型石榴石, 以副矿物的形式赋存在花岗岩中, 记录了部分熔融演化过程中元素地球化学行为的重要信息 (Cawthorn and Brown, 1976; Green, 1976, 1977; Abbott, 1981; Allan and Clarke, 1981; Miller and Stoddard, 1981; Du Bray, 1988; Spear and Kohn, 1996; Stevens *et al.*, 2007; Villaros *et al.*, 2009)。在喜马拉雅造山带的演化过程中, 中新世俯冲板片快速折返, 引起了变泥质岩的减压脱水熔融作用, 形成了分布面积广泛的淡色花岗岩和混合岩 (Harrison *et al.*, 1987; Breton and Thompson, 1988; Harris and Massey, 1994; Guillot and Le Fort, 1995; Harris *et al.*, 1995; Ayres *et al.*, 1997; Patiño Douce and Harris, 1998; Knesel and Davidson, 2002; Yang *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2004a)。在熔体的迁移过程中, 可能会捕获源岩中的部分难熔矿物, 如变质石榴石, 同时生成的熔体在冷却过程中可以结晶形成新的岩浆型石榴石, 这两类石榴石具有不同的形态和地球化学特征, 鉴定它们两者之间的差异是反演部分熔融动力学过程的重要探针。岩浆型石榴石直接从熔体中结晶生成, 具有较好的晶形, 同时, 由于稀土元素是不相容元素, 在部分熔融过程中倾向于进入熔体, 则岩浆型石榴石富集重稀土元素, 由于斜长石同时结晶, 会使石榴石高度亏损 Eu 元素。混染型石榴石是熔体从源岩中携带进入, 石榴石容易受到熔体的交代溶蚀作用, 形态和元素地球化学特征会发生改变。通过研究对比, 认为这三颗淡色花岗岩中的石榴石属于岩浆型石榴石, 而淡色体中的石榴石属于混染型石榴石。在图 3 中, 总结了喜马拉雅造山带内泥质片麻岩和基性岩中石榴石的端元成分。在三元图解 Alm-Gr₂-Spe 和 Alm-Gr₂-Prp 中, 淡色体中的石榴石落入变泥质岩区域内。进一步确定淡色体中的石榴石是从源岩泥质片麻岩中捕获的。

当与周围矿物组合平衡时, 影响石榴石的微量元素地球化学特征的因素有: (1) 母岩的有效总体成分, 和 (2) 石榴石与基质矿物之间的元素总体配分系数。在石榴石微量元素

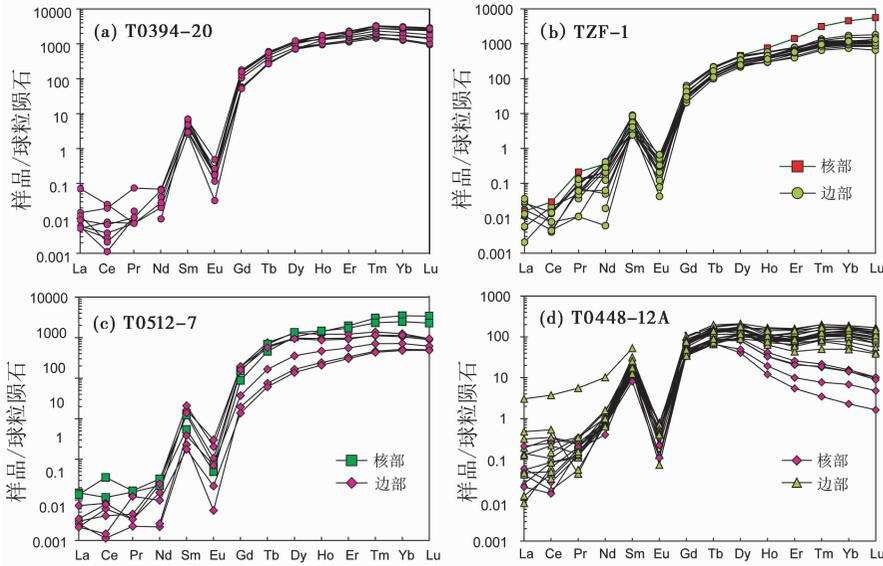


图6 喜马拉雅造山带中不同地区淡色花岗岩类中石榴石的稀土元素配分图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
 Fig.6 Chondrite-normalized REE distribution patterns for garnets in leucogranites and metapelite-hosted leucosome from different areas along the Himalayan Orogenic Belt (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

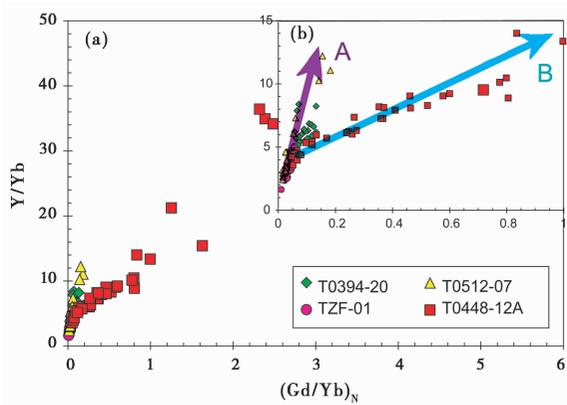


图7 喜马拉雅造山带中不同地区淡色花岗岩类中石榴石的 $(Gd/Yb)_N$ -Y/Yb 图解
 Fig.7 $(Gd/Yb)_N$ -Y/Yb diagram for garnets in leucogranites and metapelite-hosted leucosome from different areas along the Himalayan Orogenic Belt

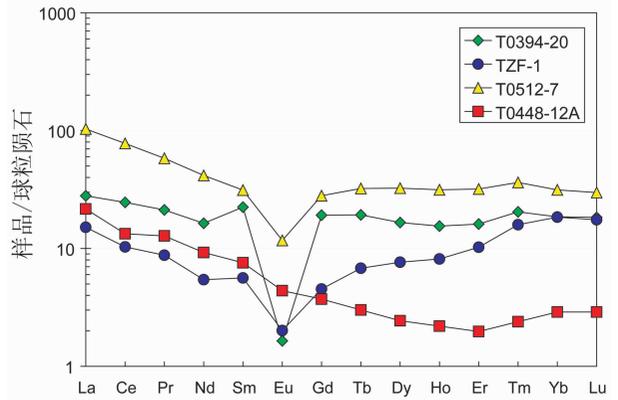


图8 喜马拉雅造山带中不同地区淡色花岗岩类的稀土元素配分图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
 Fig.8 Chondrite-normalized REE distribution patterns for leucogranites and metapelite-hosted leucosome from different areas along the Himalayan Orogenic Belt (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

剖面中,平滑变化的元素可能代表着封闭系统下的平衡配分行为。大量研究都表明流体/熔体的交代作用是引起众多地质样品的元素地球化学特征异常的主要因素之一,如富含微量元素矿物的分解/结晶、外来富含微量元素的特殊流体的作用,都可能是引起石榴石中微量元素突然变化的关键因素。在淡色花岗岩 TZF-1 和 T0512-7 中,从核部到边部, HREE 和 Y 浓度降低(图 6b, c),表明体系在薄片尺度下不再处于封闭状态,富含 HREE 和 Y 的矿物开始结晶(如锆石),体系中稀土元素浓度急剧降低,石榴石结晶所得到的 HREE 减少。同时,在花岗岩 T0512-7 中随着 HREE 和 Y 浓

度的急剧降低, Hf 浓度也同步下降,进一步证明锆石开始结晶,并且导致 Lu/Hf 比值高度变化(表 2)。在淡色体 T0448-12A 中,从核部到边部, HREE 从亏损变为平直(图 6d)。是由于石榴石核部为继承的源岩中变质石榴石,而边部是继承性石榴石与熔体反应的结果,显现了熔体的特征。与变泥质岩中典型的变质石榴石相比(图 5),花岗岩中的岩浆型石榴石明显富 Zn(图 5a)和 Mn(图 3),稍微富 HREE 和 Y(图 5 a, b), Sc 变化不大(图 5c)。

Zn 的地球化学研究表明:在角闪岩相的变泥质岩中 Zn 强烈富集于十字石中(Albee, 1972; Griffen and Ribbe,

表3 喜马拉雅造山带中不同地区淡色花岗岩类的地球化学特征(主量元素:wt%; 稀土和微量元素: $\times 10^{-6}$)

Table 3 Geochemical characteristics of leucogranites and metapelite-hosted leucosome from different areas along Himalayan Orogenic Belt (Major elements: wt%; Trace elements: $\times 10^{-6}$)

样品号	T0394-20	TZF-1	T0512-7	T0448-12A
SiO ₂	67.66	74.14	73.38	75.36
TiO ₂	0.03	0.03	0.06	0.05
Al ₂ O ₃	18.20	15.07	14.95	15.68
FeO	0.44	1.08	0.57	0.56
Fe ₂ O ₃	0.42	1.04	0.22	0.08
MnO	0.07	0.14	0.06	0.08
MgO	0.07	0.12	0.14	0.21
CaO	0.79	0.57	1.17	0.47
Na ₂ O	5.73	4.48	4.9	3.11
K ₂ O	6.38	2.18	3.47	4.87
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.05	0.09
LOI	0.59	0.43	0.39	0.03
Total	100.40	99.33	99.36	100.59
Sc	1.08	1.92	1.87	0.34
V	0.97	0.54	2.06	7.49
Zn	5.12	105	22	7.42
Rb	428	132	135	212
Sr	21.9	15.1	58	45
Y	26.1	11.2	51.3	3.26
Zr	52.1	29.9	44.7	7.3
Nb	3.77	0.39	7.87	0.91
Cs	6.58	9.34	7.09	3.45
Ba	46.5	19.4	337	365
Hf	3.38	1.94	2.29	0.24
Ta	1.03	0.12	1.82	0.12
Pb	96.2	12.3	28.0	41.4
Th	11.36	11.5	23.6	2.16
U	3.70	41.5	11.7	0.89
La	6.60	3.57	24.4	5.11
Ce	15.25	6.38	48.2	8.25
Pr	1.91	0.79	5.24	1.15
Nd	7.58	2.52	19.3	4.28
Sm	3.23	0.81	4.51	1.09
Eu	0.09	0.11	0.64	0.24
Gd	3.82	0.9	5.58	0.74
Tb	0.68	0.24	1.14	0.13
Dy	4.08	1.88	7.99	0.6
Ho	0.86	0.45	1.74	0.1
Er	2.61	1.66	5.18	0.32
Tm	0.45	0.35	0.8	0.06
Yb	3.08	3.06	5.22	0.48
Lu	0.45	0.43	0.73	0.07
A/CNK	1.02	1.40	1.07	1.39
Nb/Ta	3.67	3.25	4.32	7.58
Zr/Hf	15.41	15.41	19.52	30.42
Sc/V	1.11	3.56	0.91	0.05
Eu/Eu*	0.08	0.40	0.40	0.83
(La/Yb) _N	1.51	0.82	3.29	7.49
(La/Gd) _N	1.46	3.34	3.69	5.82
(Gd/Yb) _N	1.03	0.25	0.89	1.29

1972),在变质反应过程中 Zn 是惰性元素,不易活动(Tuisku *et al.*, 1987);在沉积岩中,Zn 富集于绿泥石中,在结晶岩中(如:花岗岩、片岩、片麻岩等)Zn 富集于电气石和黑云母中(Heinrichs *et al.*, 1980)。喜马拉雅岩浆型石榴石是从变泥质岩脱水熔融形成的熔体中结晶而成。在源岩变泥质岩中,Zn 主要富集于十字石和云母中,变质石榴石中 Zn 含量较低,约为 $9.8 \times 10^{-6} \sim 65.3 \times 10^{-6}$ (图5)。在花岗岩中,全岩中的 Zn 浓度也较低,小于 100×10^{-6} ,但在岩浆型石榴石中,含量大于 152×10^{-6} (图5)。这是由于云母发生部分熔融形成花岗质熔体,熔体结晶主要形成石英、长石、石榴石和少量的云母、电气石,熔体中的 Zn 大部分进入石榴石中。样品 T0512-7 含有少量的黑云母和白云母(图2c),云母“争夺”了部分全岩中的 Zn 元素,导致石榴石中的 Zn 含量最低。样品 TZF-1 的全岩中 Zn 含量最高,但石榴石中 Zn 含量较低,原因在于电气石的生长摄取了大量的 Zn,石榴石与电气石的平衡配分导致石榴石的 Zn 含量降低。

岩浆型石榴石具有一个明显的特征:较高的 Mn 浓度,即 5.7% ~ 10.6%,而变泥质岩中变质石榴石的 MnO 含量小于 3.5%。有的学者认为岩浆型石榴石高浓度的 Mn 元素来自于花岗岩,但是喜马拉雅淡色花岗岩中 Mn 含量小于 0.1%,全岩的 Mn 含量不可能是控制岩浆型石榴石富集 Mn 元素的主要因素。在淡色花岗岩中,岩浆型石榴石的 Mn 含量的增高反映了在花岗质岩浆结晶过程中,贫 Mn 矿物的分离结晶作用促使残留岩浆的 Mn 升高。

分析对比母岩中的变质石榴石、淡色体中的混染型石榴石和花岗岩中的岩浆型石榴石的地球化学成分,表明:与源岩的变质石榴石相比,岩浆型石榴石自形,几乎不含包裹体,具有较高的 Mn、Zn、Y 和 HREE。淡色体中捕获的混染型石榴石,被熔体交代,边部呈现港湾状结构,大部分元素的浓度被完全改变,如:主量元素(图3、图4d)和 Zn(图5a, b),而核部的 Sc(图5c)、Hf、Y(图5b)和 HREE(图5a、图6d)元素还保留有源岩的信息。本研究揭示了喜马拉雅新生代花岗岩中石榴石的来源至少有两种:从源岩中捕获的混染型石榴石和从熔体中结晶形成的岩浆型石榴石,混染型石榴石与熔体发生反应,大部分信息被“篡改”,岩浆型石榴石的具有明显高浓度的 Mn 和 Zn 元素。

5 对壳源花岗岩形成过程的指示意义

在喜马拉雅碰撞造山带演化过程中,俯冲板片在中新生代进行折返,中下地壳中的变泥质岩发生脱水熔融反应,产生了具有低 Sr/Y 比和高 Rb/Sr 比的淡色花岗岩(Harrison *et al.*, 1987; Breton and Thompson, 1988; Harris and Massey, 1994; Guillot and Le Fort, 1995; Harris *et al.*, 1995; Ayres *et al.*, 1997; Patiño Douce and Harris, 1998; Knesel and Davidson, 2002; Yang *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2004a)。在变泥质岩减压部分熔融过程中,云母脱水熔融产生熔体,同

时捕获了源岩中的变质石榴石,由于石榴石较难熔,混染型石榴石核部仍保留有源岩的部分信息,边部与熔体反应,形成了港湾状结构。在熔体中结晶出新的岩浆型石榴石,此类石榴石记录了部分熔融的动力学过程。岩浆型石榴石具有典型的“震荡型”生长环带,较高的 Mn 和 Zn 浓度,高浓度的 Zn 来源于云母;同时,斜长石和锆石的分离结晶作用,导致岩浆型石榴石 Eu 为明显的负异常,HREE 和 Hf 浓度从核部到边部显著减少,Lu/Hf 比值高度变化。地壳物质的部分熔融作用是形成壳源花岗岩的主要机制,是碰撞造山带构造演化过程的重要作用。在淡色花岗岩或淡色体中,石榴石及其他副矿物(磷灰石、独居石等)记录了丰富的有关地壳深熔作用及所形成岩浆的演化过程的重要信息。详细地解析这些矿物的地球化学特征,了解部分熔融的化学动力学过程,将是反演大型碰撞造山带中下地壳物质的物理和化学行为的重要探针。

6 结论

喜马拉雅造山带,是世界上碰撞造山带的典例,经历了多期次的构造活动、岩浆作用和变质事件,可以细致地记录大型碰撞造山带中下地壳物质的物理和化学行为。中新世俯冲板片进行折返,变泥质岩发生了减压部分熔融,形成了分布范围很广的新生代花岗岩。花岗岩中含有两类石榴石:大多数石榴石是从岩浆中结晶形成的岩浆型石榴石,表现为自形-半自形,几乎不含包裹体;淡色体中含有从源岩中捕获的混染型石榴石,石榴石具有港湾状结构。电子探针和 LA-ICP-MS 矿物化学分析表明,岩浆型石榴石的地球化学特征为:(1)从核部到边部,显示了典型的“震荡型”生长环带;(2)富集 HREE,亏损 LREE,从核部到边部,Hf、Y 和 HREE 含量降低;(3)显著的 Eu 负异常($Eu/Eu^* < 0.02$);(4)相对于变质石榴石,具有浓度较高的 Mn 和 Zn 元素。岩相学形态和地球化学特征都表明:变泥质岩在快速折返过程中云母减压部分熔融,形成的熔体携带了源岩中的变质石榴石,这些石榴石与熔体发生反应,边部被溶蚀,大部分元素的地球化学特征被完全改变,核部保留有源岩的部分微量元素信息;熔体在后期结晶过程中生成岩浆型石榴石,石榴石具有“震荡型”生长环带的特征,由于斜长石和锆石的同步结晶,导致岩浆型石榴石显示明显的 Eu 负异常和 Hf、Y 和 HREE 浓度从核部到边部显著降低,同时石榴石提取了熔体中的大部分 Zn 元素,浓度显著升高。

致谢 感谢刘福来研究员和审稿专家仔细审阅稿件,提出众多建设性修改意见。

References

Abbott RN. 1981. The role of manganese in the paragenesis of magmatic

- garnet: An example from the Old Woman-Piute Range, California: A discussion. *The Journal of Geology*, 89(6): 767–769
- Aikman AB, Harrison TM and Ding L. 2008. Evidence for early (> 44Ma) Himalayan crustal thickening, Tethyan Himalaya, southeastern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 274: 14–23
- Albee AL. 1972. Metamorphism of pelitic schists: reaction relations of chloritoid and staurolite. *Bulletin of the Geological Society of America*, 83(11): 3249–3268
- Allan BD and Clarke DB. 1981. Occurrence and origin of garnets in the South Mountain Batholith, Nova Scotia. *Canadian Mineralogist*, 19(1): 19–24
- Aoya M, Wallis SR, Terada K, Lee J, Kawakami T, Wang Y and Heizler M. 2005. North-south extension in the Tibetan crust triggered by granite emplacement. *Geology*, 33: 853–856
- Ayres M, Harris N and Vance D. 1997. Possible constraints on anatexis melt residence times from accessory mineral dissolution rates: An example from Himalayan leucogranites. *Mineralogical Magazine*, 61: 29–36
- Beaumont C, Jamieson RA, Nguyen MH and Lee B. 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 414: 738–742
- Breton NL and Thompson AB. 1998. Fluid-absent (dehydration) melting of biotite in metapelites in the early stages of crustal anatexis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99: 226–237
- Brown M. 2007. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: Mechanisms and consequences. *Journal of the Geological Society*, 164: 709–730
- Burg JP, Guiraud M, Chen GM and Li GC. 1984. Himalayan metamorphism and deformations in the North Himalayan Belt (southern Tibet, China). *Earth and Planetary Science Letters*, 69(2): 391–400
- Cawood PA, Johnson MRW and Nemchin AA. 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1/2): 70–84
- Cawthorn RG and Brown PA. 1976. A model for the formation and crystallization of corundum-normative calc-alkaline magmas through amphibole fractionation. *The Journal of Geology*, 467–476
- Chernoff CB and Carlson WD. 1999. Trace element zoning as a record of chemical disequilibrium during garnet growth. *Geology*, 27(6): 555–558
- Corrie SL, Kohn MJ and Vervoort JD. 2010. Young eclogite from the Greater Himalayan Sequence, Arun Valley, eastern Nepal: *P-T-t* path and tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 289(3/4): 406–416
- Cottle JM, Searle MP, Horstwood MSA and Waters DJ. 2009. Timing of midcrustal metamorphism, melting, and deformation in the Mount Everest region of southern Tibet revealed by U-Th-Pb geochronology. *The Journal of Geology*, 117(6): 643–664
- Debon F, Le Fort P, Sheppard S and Sonet J. 1986. The four plutonic belts of the Transhimalaya-Himalaya: A chemical, mineralogical, isotopic, and chronological synthesis along a Tibet-Nepal Section. *Journal of Petrology*, 27: 219–250
- Deniel C, Vidal P, Fernandez A, Fort P and Peucat JJ. 1987. Isotopic study of the Manaslu granite (Himalaya, Nepal): Inferences on the age and source of Himalayan leucogranites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 96(1): 78–92
- Ding L, Kapp P and Wan X. 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet. *Tectonics*, 24(3): 1–18
- Du Bray EA. 1988. Garnet compositions and their use as indicators of peraluminous granitoid petrogenesis-southeastern Arabian Shield. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 100(2): 205–212
- Ganguly J, Dasgupta S, Cheng W and Neogi S. 2000. Exhumation history of a section of the Sikkim Himalayas, India: Records in the metamorphic mineral equilibria and compositional zoning of garnet. *Earth and Planetary Science Letters*, 183(3–4): 471–486

- Gao LE, Zeng LS, Liu J and Xie KJ. 2009. Early Oligocene Na-rich peraluminous leucogranites in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet: Formation mechanism and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2289–2302 (in Chinese with English abstract)
- Gao LE. 2010. Metamorphic and anatexis events in the Yardoi gneiss dome, Southern Tibet. Master Degree Thesis. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1–153 (in Chinese with English summary)
- Gao LE, Zeng LS and Hu GY. 2010. High Sr/Y two-mica granite from Quedang area, southern Tibet, China: Formation mechanism and tectonic implication. *Geological Bulletin of China*, 29(2–3): 214–226 (in Chinese with English abstract)
- Gao LE, Zeng LS and Xie KJ. 2012. Eocene high grade metamorphism and crustal anatexis in the North Himalaya Gneiss Domes, Southern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 57: 639–650. doi: 10.1007/s11434-011-4805-4
- Green TH. 1976. Experimental generation of cordierite-or garnet-bearing granitic liquids from a pelitic composition. *Geology*, 4(2): 85–88
- Green TH. 1977. Garnet in silicic liquids and its possible use as a PT indicator. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 65(1): 59–67
- Griffen DT and Ribbe PH. 1972. The crystal chemistry of staurolite. *American Journal of Science*, 273: 479–495
- Groppo C, Lombardo B, Rolfo F and Pertusati P. 2007. Clockwise exhumation path of granulitized eclogites from the Ama Drime range (Eastern Himalayas). *Journal of Metamorphic Geology*, 25(1): 51–75
- Guillot S and Le Fort P. 1995. Geochemical constrains on the bimodal origin of High Himalayan leucogranites. *Lithos*, 35: 221–234
- Hall A. 1965. The origin of accessory garnet in the Donegal granite. *Mineralogical Magazine*, 35: 628–633
- Harris N and Massey J. 1994. Decompression and anatexis of Himalayan metapelites. *Tectonics*, 13: 1537–1546
- Harris N, Ayres M and Massey J. 1995. Geochemistry of granitic melts produced during the incongruent melting of muscovite-implications for the extraction of Himalayan leucogranite magmas. *Journal of Geophysical Research*, 100: 15767–15777
- Harrison TM, Aleinikoff JN and Compston W. 1987. Observations and controls on the occurrence of inherited zircon in Concord-type granitoids, New Hampshire. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(9): 2549–2558
- Harrison TM, Grove M, Lovera OM, Catlos EJ and D'Andrea J. 1999. The origin of Himalayan anatexis and inverted metamorphism: Models and constraints. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17: 755–772
- Heinrichs H, Schulz-Dobrick B and Wedepohl KH. 1980. Terrestrial geochemistry of Cd, Bi, Tl, Pb, Zn and Rb. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(10): 1519–1533
- Hiroi Y and Ellis DJ. 1994. The use of garnet porphyroblasts in highly deformed pelitic rocks to infer the former presence of partial melting. *Eos (Transactions, American Geophysical Union)*, 75: 364
- Hodges KV, Parrish RR, Housh TB, Lux DR, Burchfiel BC, Royden LH and Chen Z. 1992. Simultaneous Miocene extension and shortening in the Himalaya orogen. *Science*, 258: 1466–1469
- Hodges KV. 2000. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives. *Geological Society of America Bulletin*, 112: 324–350
- Hu MY, He HL, Zhan XC, Fan XT, Wang G and Jia ZR. 2008. Matrix normalization for in-situ multi-element quantitative analysis of zircon in Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 36(7): 947–953 (in Chinese with English abstract)
- Inger S and Harris N. 1993. Geochemical constraints on leucogranite magmatism in the Langtang Valley, Nepal Himalaya. *Journal of Petrology*, 34: 345–368
- King J, Harris N, Argles T, Parrish R and Zhang HF. 2011. The contribution of crustal anatexis to the tectonic evolution of Indian crust beneath southern Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 123: 218–239
- Knesel KM and Davidson JP. 2002. Insight into collisional magmatism from isotopic fingerprints of melting reactions. *Science*, 296: 2206–2208
- Kohn MJ. 2003. Geochemical zoning in metamorphic minerals. In: Rudnick RL (ed.). *The Crust. Treatise on Geochemistry*, 3: 229–261
- Le Fort P. 1981. Manaslu leucogranite: A collision signature of the Himalaya, A model for its genesis and emplacement. *Geophysical Research Letters*, 86: 10545–10568
- Le Fort P, Cuney M, Deniel C, France-Lanord C, Sheppard SMF, Upreti BN and Vidal P. 1987. Crustal generation of the Himalayan leucogranites. *Tectonophysics*, 134(1–3): 39–57
- Lee J, Hacker BR, Dinklage WS, Wang Y, Gans P, Calvert A, Wan JL, Chen WJ, Blythe AE and McClelland W. 2000. Evolution of the Kangmar dome, southern Tibet: Structural, petrologic and thermochronologic constraints. *Tectonics*, 19(5): 872–895
- Lee J and Whitehouse MJ. 2007. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon ages. *Geology*, 35: 45–48
- Li DW, Liao QA, Yuan YM, Wan YS, Liu DM, Zhang XH, Yi SH, Cao SZ and Xie DF. 2003. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granulites at Rimana (Southern Tibet) in the central segment of Himalayan Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 48(23): 2647–2650
- Liu SW, Zhang JJ, Shu GM and Li QG. 2005. Mineral chemistry, PTi paths and exhumation processes of mafic granulites in Dinggye, Southern Tibet. *Science in China (Series D)*, 48(11): 1870–1881
- Lombardo B and Rolfo F. 2000. Two contrasting eclogite types in the Himalayas; Implications for the Himalayan orogeny. *Journal of Geodynamics*, 30(1–2): 37–60
- Miller CF and Stoddard EF. 1981. The role of manganese in the paragenesis of magmatic garnet: An example from the Old Woman-Piute Range, California. *The Journal of Geology*: 233–246
- Murphy MA. 2007. Isotopic characteristics of the Gurla Mandhata metamorphic core complex: Implications for the architecture of the Himalayan orogen. *Geology*, 35(11): 983–986
- Pandey A, Leech M, Milton A, Singh P and Verma PK. 2010. Evidence of former majoritic garnet in Himalayan eclogite points to 200-km-deep subduction of Indian continental crust. *Geology*, 38(5): 399–402
- Patiño Douce AE and Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan Anatexis. *Journal of petrology*, 39: 689–710
- Qi XX, Zeng LS, Meng XJ, Xu ZQ and Li TF. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating for Dala granite in the Tethyan Himalaya and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1501–1508 (in Chinese with English abstract)
- Quigley MC, Yu LJ, Gregory C, Corvino A, Sandiford M, Wilson CJL and Liu XH. 2008. U-Pb SHRIMP zircon geochronology and *T-t-d* history of the Kampa dome, southern Tibet. *Tectonophysics*, 446(1): 97–113
- Schärer U, Xu R and Allegre C. 1986. U-(Th)-Pb systematics and ages of Himalayan leucogranites, South Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 77: 35–48
- Searle MP, Parrish RR, Hodges KV, Hurford A, Ayres MW and Whitehouse MJ. 1997. Shisha Pangma leucogranite, south Tibetan Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin and emplacement. *Journal of Geology*, 105: 295–317
- Searle MP and Szulc AG. 2005. Channel flow and ductile extrusion of the high Himalayan slab-the Kangchenjunga-Darjeeling profile, Sikkim Himalaya. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(1): 173–185
- Spear FS and Kohn MJ. 1996. Trace element zoning in garnet as a monitor of crustal melting. *Geology*, 24(12): 1099–1102
- Stevens G, Villaros A and Moyen JF. 2007. Selective peritectic garnet entrainment as the origin of geochemical diversity in S-type granites. *Geology*, 35(1): 9–12

- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313–345
- Symmes GH and Ferry JM. 1992. The effect of whole-rock MnO content on the stability of garnet in pelitic schists during metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, 10(2): 221–237
- Tuisku P, Ruosresuo P and Häkkinen AM. 1987. The metamorphic behaviour and petrogenetic significance of zinc in amphibolite facies, staurolite-bearing mica schists, Puolankajärvi Formation, Central Finland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(6): 1639–1650
- Villaras A, Stevens G, Moyen JF and Buick IS. 2009. The trace element compositions of S-type granites: Evidence for disequilibrium melting and accessory phase entrainment in the source. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(4): 543–561
- Warren RC. 1970. Electron microprobe investigations of almandine garnets from a quartz diorite stock and adjacent metamorphic rocks, British Columbia. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 51: 444
- Xu ZQ, Zhang JS, Liang FH, Qi XX, Liu FL, Zeng LS, Liu DY, Li HB, Wu CL, Shi RD and Chen SY. 2005. Pan-African and Early Paleozoic orogenic events in the Himalaya terrane: Inference from SHRIMP U-Pb zircon ages. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Cai ZH, Zhang ZM, Li HQ, Chen FY and Tang ZM. 2008. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, Eastern Himalayan Syntaxis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1463–1476 (in Chinese with English abstract)
- Yang XS, Jin ZM, Huenges E, Gao S, Wunder B and Schilling FR. 2002. Genesis of granulite in Himalayan lower crust: Evidences from experimental study at high temperature and high pressure. *Chinese Science Bulletin*, 47: 448–454
- Yang XY, Zhang JJ, Qi GW, Wang DC, Guo L, Li PY and Liu J. 2009. Structure and deformation around the Gyirong basin, North Himalaya, and onset of the South Tibetan detachment system. *Science in China (Series D)*, 52(8): 1046–1058
- Yu JJ, Zeng LS, Liu J, Gao LE and Xie KJ. 2011. Early Miocene leucogranites in Dinggye area, southern Tibet: Formation mechanism and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1961–1972 (in Chinese with English abstract)
- Zeng LS, Asimow PD and Saleeby JB. 2005. Coupling of anatectic reactions and dissolution of accessory phases and the Sr and Nd isotope systematics of anatectic melts from a metasedimentary source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(14): 3671–3682
- Zeng LS, Liang FH, Xu ZQ and Qi XX. 2008. Metapelites in the Himalayan orogenic belt and their protoliths. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1517–1527 (in Chinese with English abstract)
- Zeng LS, Liu J, Gao LE, Xie KJ and Wen L. 2009. Early Oligocene anatexis in the Yardois gneiss dome, southern Tibet and geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 54: 104–112
- Zeng LS, Gao LE, Xie KJ and Liu J. 2011a. Mid-Eocene high Sr/Y granites in the Northern Himalayan Gneiss Domes: Melting thickened lower continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 303: 251–266
- Zeng LS, Gao LE and Xie KJ. 2011b. Concurrence of Mid-Miocene high Sr/Y granite and leucogranite in the Yardois gneiss dome, Tethyan Himalaya, Southern Tibet. *Mineralogical Magazine*, 75(3): 2245
- Zeng LS, Gao LE, Dong CY and Tang SH. 2012. High pressure melting of metapelite and the formation of Ca-rich granitic melts in the Namche Barwa Massif, Southern Tibet. *Gondwana Research*, 21: 138–151
- Zhang HF, Harris N, Parrish R, Kelley S, Zhang L, Rogers N, Argles T and King J. 2004a. Causes and consequences of protracted melting of the mid-crust exposed in the North Himalayan antiform. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(1–2): 195–212
- Zhang HF, Harris N, Parrish R, Zhang L and Zhang Z. 2004b. U-Pb ages of Kude and Sajia leucogranites in Sajia dome from North Himalaya and their geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(19): 2087–2092
- Zhang JJ, Guo L and Zhang B. 2007. Structure and kinematics of the Yalashangbo dome in the northern Himalayan dome belt, China. *Chinese Journal of Geology*, 42(1): 16–30 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 高利娥, 曾令森, 刘静, 谢克家. 2009. 藏南也拉香波早渐新世富钠过铝质淡色花岗岩的成因机制及其构造动力学意义. *岩石学报*, 25(9): 2289–2302
- 高利娥. 2010. 藏南雅拉香波片麻岩穹窿的变质作用以其深熔事件的研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1–153
- 高利娥, 曾令森, 胡古月. 2010. 藏南确当高 Sr/Y 比值二云母花岗岩的形成机制及其构造动力学意义. *地质通报*, 29(2–3): 214–226
- 高利娥, 曾令森, 谢克家. 2011. 北喜马拉雅片麻岩穹窿始新世高级变质和深熔作用的厘定. *科学通报*, 56(36): 3078–3090
- 胡明月, 何红蓼, 詹秀春, 樊兴涛, 王广, 贾泽荣. 2008. 基体归一定量技术在激光烧蚀-等离子体质谱法锆石原位多元素分析中的应用. *分析化学*, 36(7): 947–953
- 戚学祥, 曾令森, 孟祥金, 许志琴, 李天福. 2008. 特提斯喜马拉雅打拉花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 24(7): 1501–1508
- 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 戚学祥, 刘福来, 曾令森, 刘敦一, 李海兵, 吴才来, 史仁灯, 陈松永. 2005. 喜马拉雅地体的泛非-早古生代造山事件年龄记录. *岩石学报*, 21(1): 1–12
- 许志琴, 蔡志慧, 张泽明, 李化启, 陈方远, 唐泽民. 2008. 喜马拉雅东构造结-南迦巴瓦构造及组构运动学. *岩石学报*, 24(7): 1463–1476
- 于俊杰, 曾令森, 刘静, 高利娥, 谢克家. 2011. 藏南定结地区早中新世淡色花岗岩的形成机制及其构造动力学意义. *岩石学报*, 27(7): 1961–1972
- 曾令森, 梁凤华, 许志琴, 戚学祥. 2008. 喜马拉雅造山带变泥质岩系及其地球化学特征. *岩石学报*, 24(7): 1517–1527
- 曾令森, 刘静, 高利娥, 谢克家, 文力. 2009. 藏南也拉香波穹隆早渐新世地壳深熔作用及其地质意义. *科学通报*, 54(3): 373–381
- 张进江, 郭磊, 张波. 2007. 北喜马拉雅穹隆带雅拉香波穹隆的构造组成和运动学特征. *地质科学*, 42(1): 16–30