新疆达拉布特蛇绿混杂岩中辉长岩岩石学、微量元素地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究*

陈博 朱永峰**

CHEN Bo and ZHU YongFeng**

北京大学地球与空间科学学院,造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京 100871

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, China; School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2010-11-13 收稿,2011-05-15 改回.

Chen B and Zhu YF. 2011. Petrology, geochemistry and zircon U-Pb chronology of gabbro in Darbut ophiolitic mélange, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6):1746 – 1758

Abstract Gabbro, gabbroporphyrite and hornblende gabbro, occurring in spinel serpentinite as irregular blocks in the Darbut ophiolitic mélange, West Junngar (North Xinjiang, NW China), are studied in this paper. The hornblende gabbro was dated to be 426 ±6Ma (MSWD = 0.87) by zircon SHRIMP. This indicates the Darbut Paleo-Ocean existed at Middle Silurian. Petrography and trace element geochemistry of the whole rocks and minerals suggest that gabbro, gabbroporphyrite and hornblende gabbro were derived from Cr-enriched mantle source, and these rocks were formed in different stages of magma evolution. Based on the calculation using Darbut spinel-lherzolite as mantle source, gabbro was formed by the melt fractional crystallization, while gabbroporphyrite and hornblende gabbro were formed via crystallization of the remnant melts.

Key words Ophiolitic mélange; Gabbro; Darbut; Xinjiang

摘 要 新疆西准噶尔地区达拉布特蛇绿混杂岩带中的辉长岩、辉长玢岩、角闪辉长岩呈不规则块体分布于蛇纹石化的地幔岩(尖晶石蛇纹岩)中。锆石 SHRIMP 定年显示角闪辉长岩形成于 426 ±6Ma (MSWD = 0.87),表明达拉布特所代表的古洋盆在中志留世就已存在。岩相学和微量元素地球化学研究表明,辉长岩、辉长玢岩、角闪辉长岩均来源于富 Cr 的地幔源区,确认 3 类岩石为同源岩浆演化的产物。选取达拉布特尖晶石二辉橄榄岩为源区所做的模拟显示:尖晶石二辉橄榄岩发生 15% 的部分熔融后的残余体形成了方辉橄榄岩,熔体通过分离结晶形成辉长岩,剩余熔体结晶形成辉长玢岩和角闪辉长岩。

关键词 蛇绿混杂岩;辉长岩;达拉布特;新疆

中图法分类号 P588.124; P597.3

1 引言

新疆西准噶尔地区是中亚造山带的重要组成部分,在玛依勒山、达拉布特断裂两侧,唐巴勒、白碱滩-百口泉、塔尔巴哈台和洪古勒楞地区均出露蛇绿岩(图 1a)。这些蛇绿岩呈构造混杂状产出,但组分基本齐全,与围岩呈断层接触或呈角度不整合接触。塔尔巴哈台蛇绿岩产于下石炭统黑山头组的火山岩及沉积岩地层中,在变辉长岩获得的锆石的 U-Pb 年龄为 478 ±3.3Ma(朱永峰和徐新,2006)。洪古勒楞蛇绿岩的围岩地层从中奥陶统到下石炭统均有,放射性同位素定年显示该蛇绿岩形成于中-晚奥陶世(白文吉等,1986;张弛和黄萱,1992)。唐巴勒蛇绿岩被早志留世的复理石组合以角度不整合覆盖。同位素年代学数据显示其时代为早奥陶世-晚志留世(冯益民,1986;朱宝清等,1987;张弛和黄萱,1992),硅质岩所产放射虫的时代为中奥陶世(新疆维吾尔自

* 本文受国家自然科学基金项目(41072041)和国家国际科技合作项目(2010DFB23390)联合资助.

第一作者简介:陈博,男,1985 年生,博士研究生,地球化学专业

** **通讯作者**:朱永峰,男,教授,博士生导师,地球化学专业, E-mail: yfzhu@pku.edu.cn

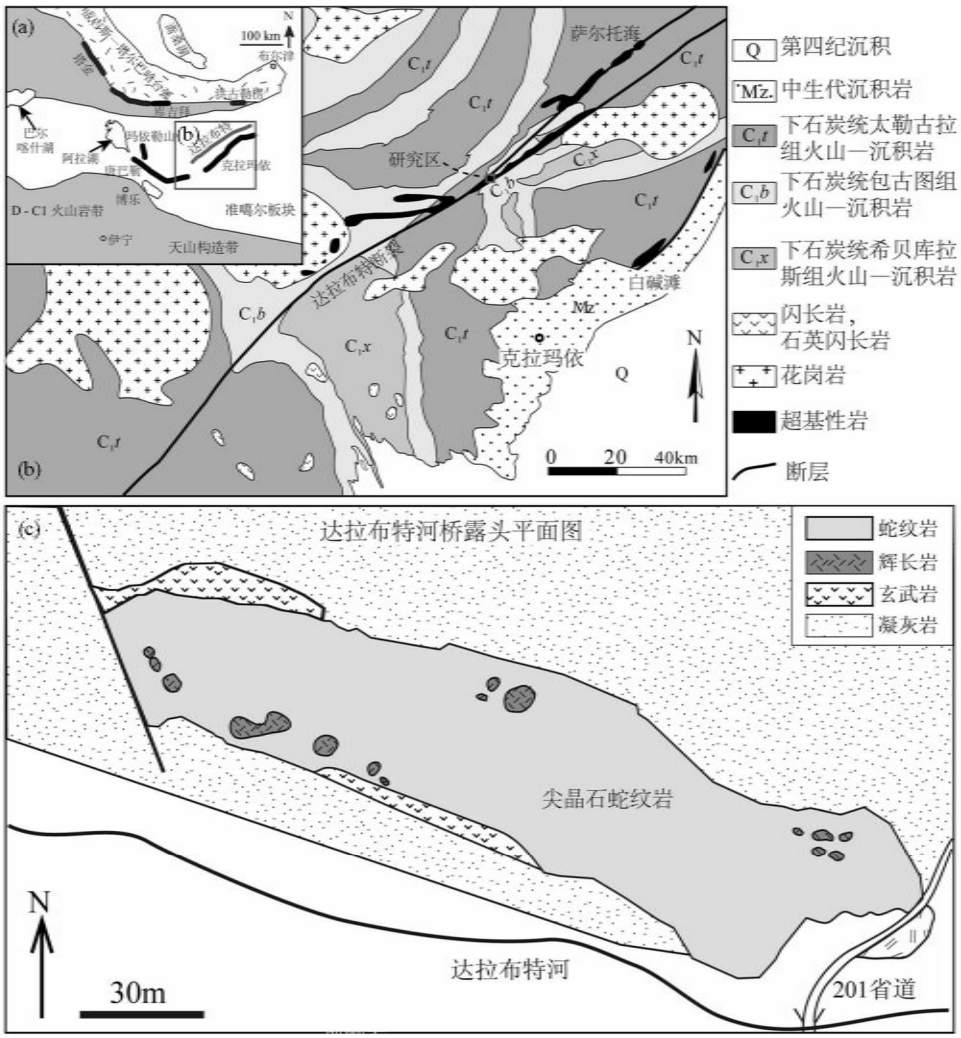


图 1　西准噶尔地区蛇绿岩展布图(a)、研究区区域地质图(b)以及野外露头地质图(c)

Fig. 1　Simplified geological map showing the distribution of ophiolites in western Junggar (a), geological map for the studied region (b) and outcrop near the Darbut bridge (c)

治区地质矿产局,1993)。玛依勒山蛇绿岩被划归为中上志留统玛依勒组,与其上同属该组的类复理石建造呈断层接触。张弛和黄萱(1992)在那伦索地区蛇绿岩块周围硅质岩中发现志留纪放射虫化石;董连慧等(2010)引用了新疆有色地质勘查局七〇一队在 1 ∶ 5 万区调时从基性熔岩中获得的 2 组 Rb-Sr 年龄(435.3 ±6.5Ma 和 432.5 ±7.4Ma)。克拉玛依蛇绿岩分布于白碱滩-百口泉地区,由辉长岩锆石 SHRIMP 定年给出了 414 ±8.6Ma 和 332 ±14Ma 2 组数据(徐新等,2006),从硅质岩中分选出的微体古生物却属于中奥陶世晚期-晚奥陶世(何国琦等,2007)。

达拉布特蛇绿岩沿 NE 向的达拉布特断裂展布,主要由方辉橄榄岩、纯橄岩(含铬铁矿)、辉长岩、辉绿岩、枕状和块状熔岩及硅质岩组成,围岩为下石炭统太勒古拉组凝灰岩。辉长岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 395 ±1.2Ma(张弛和黄萱,1992),锆石 U-Pb 年龄为 391 ±6.8Ma(辜平阳等,2009)。同时,在阿克巴斯套岩体中识别出年龄为 302Ma 的浅色辉长岩(刘希军等,2009),而侵入到达拉布特蛇绿岩的花岗岩的年龄限定了该蛇绿岩侵位时代不晚于 308Ma(陈石和郭召杰,2010)。这些年代学上的矛盾表明,达拉布特蛇绿岩带中出露的辉长岩具有不同地质特征、岩浆源区,或经历了变质改造。本文研究达拉布特河桥附近蛇绿混杂岩露头上出露的辉长岩,测定其岩浆锆石 U-Pb 年龄,分析其岩浆源区的性质以及岩浆演化过程。

2　区域地质

研究区在构造区划上属于哈萨克斯坦-准噶尔板块。该区域分布最广的地层是石炭纪的火山-沉积岩系,从该地层的凝灰岩中获得的锆石 SHRIMP 年龄为 328 ~ 357Ma(王瑞和朱永峰,2007;安芳和朱永峰,2009;郭丽爽等,2010)。这一地区地质构造复杂,出露多条蛇绿混杂岩带,达拉布特蛇绿

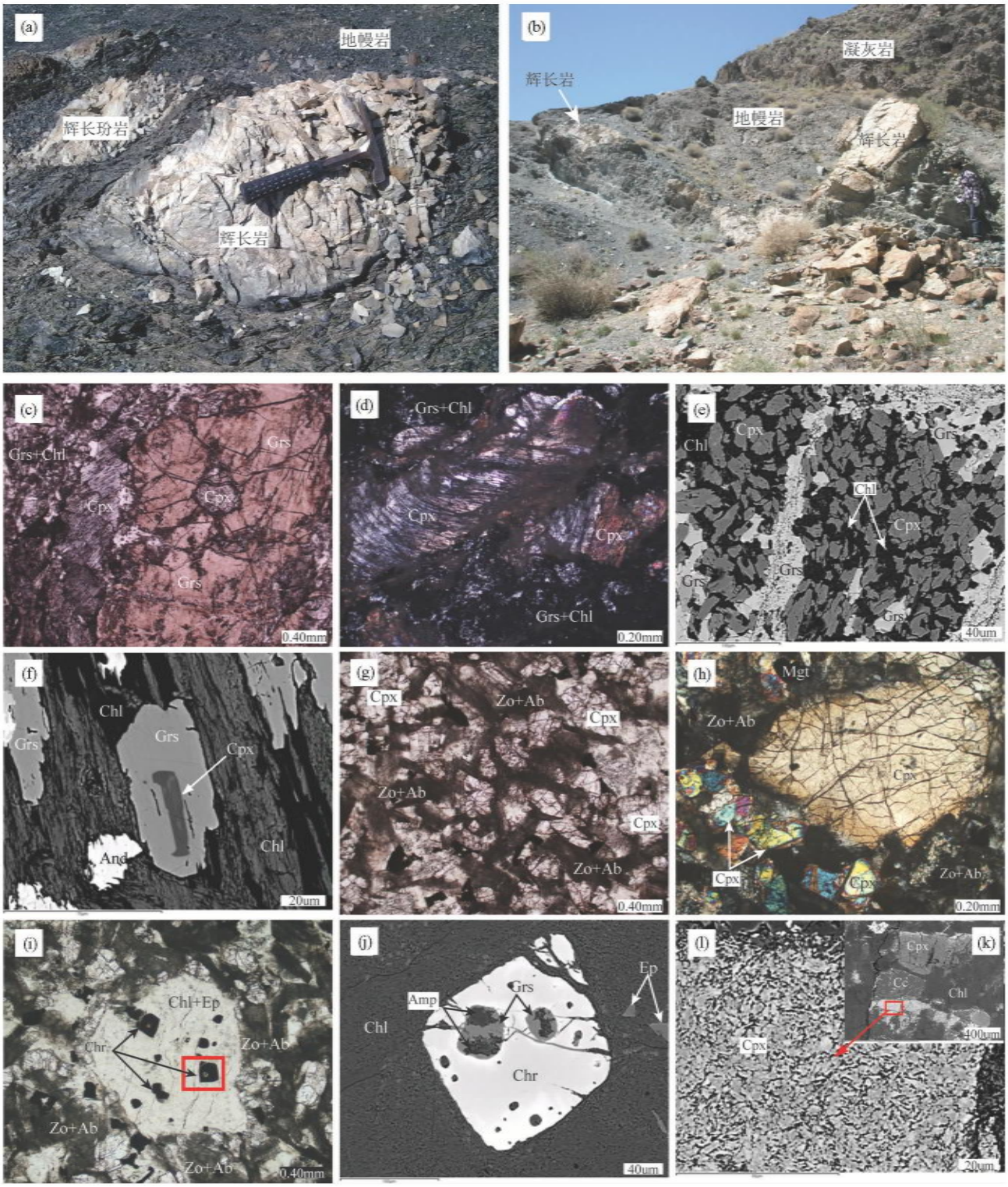


图 2 辉长岩和辉长玢岩野外照片和显微照片

(a、b)-辉长岩和辉长玢岩野外露头照片；(c)-被钙铝榴石取代的斜长石中包裹单斜辉石；(d)-单斜辉石发育塑性变形；(e)-变质形成的细粒单斜辉石与钙铝榴石、绿泥石共生；(f)-钙铝榴石中的单斜辉石残晶；(g)-辉长玢岩的基质由单斜辉石和蚀变斜长石构成辉长-辉绿结构；(h)-单斜辉石斑晶具有核边结构；(i)-单斜辉石斑晶(假象)中包裹铬铁矿；(j)-(i)的局部放大，显示出铬铁矿中含有硅酸盐矿物包体；(k、l)-变质形成的细粒单斜辉石集合体. Ab-钠长石；Amp-角闪石；And-钙铁榴石；Cc-方解石；Chl-绿泥石；Chr-铬铁矿；Cpx-单斜辉石；Ep-绿帘石；Grs-钙铝榴石；Mgt-磁铁矿；Zo-黝帘石

Fig. 2 Photos of gabbro and gabbro-porphyrite

(a, b)-photos of outcrop for gabbro and gabbroporphyrite; (c)-clinopyroxene enclosed by plagioclase which emplaced by grossular; (d)-clinopyroxene developed plastic deformation; (e)-fine grain clinopyroxene formed by metamorphism growing with grossular and chlorite; (f)-clinopyroxene relict in grossular; (g)-the matrix of gabbroporphyrite composed of clinopyroxene and altered plagioclase; (h)-clinopyroxene phenocryst in gabbroporphyrite with core-ridge texture; (i)-clinopyroxene phenocryst (pseudomorphism) enveloped chromite; (j)-enlarge scale of Fig. 2i shows silicate inclusions in chromite; (k, l)-fine grain clinopyroxene formed by metamorphism. Ab-albite; Amp-amphibole; And-andradite; Cc-calcite; Chl-chlorite; Chr-chromite; Cpx-clinopyroxene; Ep-epidote; Grs-grossular; Mgt-magnetite; Zo-zoisite

岩带位于克拉玛依市以北的扎伊尔山区，呈 NE 向沿达拉布特断裂带及其北侧次级断裂产出，全长约 100km，最宽处(萨尔托海)达到 8km。该蛇绿岩带各岩石单元出露较为齐全。

达拉布特河与省道 201 交汇处附近为达拉布特蛇绿岩出露较好的地区之一(图 1b)。该地区出露大面积的蛇纹岩呈带状沿近东西向分布。蛇纹岩周围出露下石炭统的凝灰岩，其中还夹有少量的硅质岩、火山角砾岩。蛇纹岩与这些火山沉积地层之间以断层形式接触。在断层面附近发育破碎带。在北侧的破碎带附近出露的玄武岩发生了强烈变形，在南侧出露玄武岩呈块状(图 1c)。蛇纹岩的原岩主要为方辉橄榄岩和少量橄榄辉石岩。这些岩石虽然发生了强烈蛇纹石化，橄榄石和辉石都被蛇纹石取代，但保留了大量原生矿物的假象，其中的铬尖晶石与辉石构成共晶连生结构(陈博和朱永峰，2008)。基性岩块包括辉长岩、辉长玢岩、角闪辉长岩，它们大小不一，形状各异。辉长岩呈透镜状或支离脉体状嵌布在尖晶石蛇纹岩中(图 2a, b)，辉长玢岩、角闪辉长岩则呈耐风化的丘状突出于超镁铁岩之上，部分角闪辉长岩显示出明显的层状构造(图 3a)。

3 岩相学

3.1 辉长岩

辉长岩主要由含水石榴石和单斜辉石组成，可见少量绿泥石和榍石。受异剥钙榴岩化作用改造，原岩结构受到破坏。单斜辉石在不同样品中的含量变化很大，分为 2 类：(1)辉长岩中的原生单斜辉石，半自形，粒度可达 1mm。此类单斜辉石发育密集的裂理和塑性变形(图 2c, d)(与方辉橄榄岩中辉石发育的塑性变形一致)。个别样品中由石榴石组成的斜长石假象与单斜辉石组合仍然保留着辉长结构，部分单斜辉石被包裹在斜长石假象中(图 2c)。该类单斜辉石边缘被绿泥石交代，而局部被片状的钙铝榴石交代，交代单斜辉石的钙铝榴石富含 Cr、Ti，与交代斜长石的钙铝榴石相区别；(2)细粒的单斜辉石(图 2e)，该类单斜辉石是异剥钙榴岩化过程中强烈改造形成的，颗粒细小，粒径 0.3 ~ 0.6mm，且晶形不规则，与钙铝榴石、绿泥石等蚀变矿物呈交织状。还有极少的颗粒完全被钙铝榴石包裹(图 2f)。取代斜长石的石榴石为钙铝榴石-钙铁榴石。

3.2 辉长玢岩

辉长玢岩主要由单斜辉石和斜长石组成，见有少量铬铁矿。整体呈似斑状结构，基质为显晶质，呈嵌晶结构，局部为辉绿结构(图 2g, h)。斑晶为单斜辉石，粒度可达 1mm，常包有自形的斜长石，构成含长嵌晶结构。部分单斜辉石斑晶已分解为绿泥石、绿帘石，只保留了原生矿物假象。单斜辉石斑晶中常包有自形的铬铁矿，在铬铁矿中还含有硅酸盐矿物包体，这些包体矿物已分解为形态不规则的角闪石 + 钙铝榴石组合(图 2i, j)。受低级变质作用影响，斜长石完全分解为钠长石和黝帘石，基质中的单斜辉石转变为方解石、透闪石、绿泥石或新生单斜辉石，变质形成的单斜辉石呈细小颗粒的集合体(图 2k, l)。

3.3 角闪辉长岩

角闪辉长岩主要由角闪石、斜长石(已完全分解)、单斜辉石组成。呈两种构造产出：(1)层状构造。宏观上呈黑白相间的条带(宽 5 ~ 10mm)，与堆晶辉长岩相似(图 3a)。显微镜下，白色条带以斜长石为主(>95%)；黑色条带主要为斜长石、角闪石构成的粒状嵌晶结构，矿物含量变化大，其中斜长石约 30% ~ 50%，角闪石约 70% ~ 50%，单斜辉石含量很少。在黑色条带区域局部可见宽约 5mm 的角闪石层；(2)块状构造。宏观上各矿物分布均匀，在显微镜下分为两种结构：等粒结构，矿物粒径 0.5 ~ 1mm，矿物之间呈镶嵌状，局部为辉绿结构，其中斜长石占 40%，角闪石占 35%，单斜辉石占 20%，磁铁矿、榍石、磷灰石等副矿物约占 5%；似斑状结构，斑晶约占全岩的 5%，斑晶矿物为单斜辉石，呈半自形，具有角闪石的反应边，粒度达 1mm。基质均为显晶质，由角闪石、单斜辉石、蚀变斜长石构成，其中，斜长石占 40%，角闪石占 45%，单斜辉石占 10%，副矿物 5%。矿物粒度小于 0.3mm，局部粒径不到 0.1mm，并且斜长石有弱的定向，单斜辉石和角闪石呈短柱状。个别样品的结构呈现出由斑状结构到等粒结构的截然变化(图 3b, c)。

棕黄色的角闪石为该类岩石中含量最多的矿物，角闪石中含有大量的包体矿物，主要为单斜辉石，另有少量的磷灰石、榍石、磁铁矿。遭受变质作用影响的斜长石晶形被破坏，边界浑圆，表现出极不规则的形态。但也有部分斜长石假象保留了自形的板柱状晶形。在粗粒结构样品的局部区域，这些自形的斜长石搭成格架，半自形-他形的角闪石和单斜辉石充填在格架中，构成辉绿结构。斜长石分解为钠长石 + 黝帘石，局部出现钙铝榴石。钙铝榴石在斜长石假象中的含量具有渐变特征，由黝帘石、少量钠长石组成的斜长石假象逐渐过渡到假象中零星出现钙铝榴石，最后出现以钙铝榴石为主的斜长石假象。单斜辉石的含量少于角闪石和斜长石，或

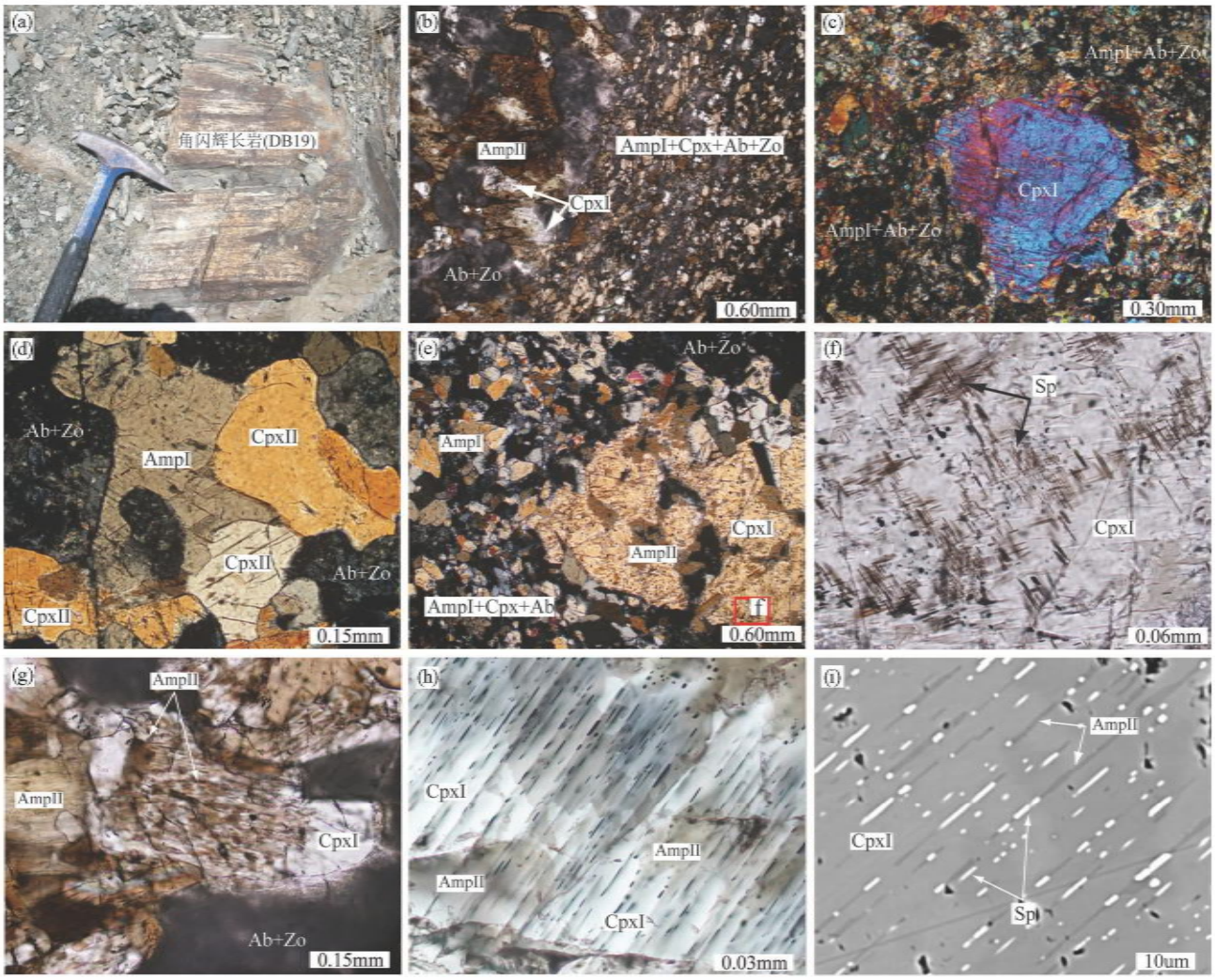


图 3 角闪辉长岩野外照片与显微照片

(a)-层状角闪辉长岩野外照片;(b、c)-角闪辉长岩的不同结构:(b)-等粒结构过渡为斑状结构;(c)-斑状结构;(d)-Cpx II 与 Amp I 平衡共生;(e-i)-Amp II 交代 Cpx I,Cpx I 发育棒状的铬尖晶石,其中(f)为(e)的局部放大. Ab-钠长石,Amp-角闪石;Cpx-单斜辉石;Sp-尖晶石;Zo-黝帘石

Fig. 3 Photos of hornblende gabbro

(a)-photo of hornblende gabbro with layer texture; (b, c)-different texture in hornblende gabbro; (b)-granulitic texture transforms to porphyritic texture; (c)-porphyritic texture; (d)-Cpx II equilibrated with AmpI; (e-i)-Cpx I emplaced by Amp II, Cr-spinel rods in Cpx I, Fig. 3f is enlarge scale of Fig. 3e. Ab-albite; Amp-amphibole; Cpx-clinopyroxene; Zo-zoisite; Sp-spinel

者与角闪石呈反应关系(以下简称为 Cpx I),或者与角闪石呈共生关系(以下简称为 Cpx II)。Cpx I 普遍被角闪石交代(图 3g-i),交代作用不仅发生在单斜辉石边缘,也出现在单斜辉石内部,这些交代单斜辉石的角闪石也呈黄绿色,它们或呈斑驳状杂乱无章,或与尖晶石族矿物平行分布,这些平行分布的角闪石局部呈规则的棒状,局部宽窄不一,具有不规则的外形(图 3i)。单斜辉石斑晶和等粒结构样品中的部分粗粒单斜辉石均属此类。Cpx II 中发育 2 组互相垂直,或呈一组平行分布的棒状棕褐色或黑色的尖晶石族矿物,有的密集成环状分布在单斜辉石边缘,有的仅分布在单斜辉石中心(图 3f, h, i)。Cpx II 与角闪石接触多成镶嵌状,Cpx II 不发育棒状的尖晶石族矿物并且较少受到角闪石的交代作用影响,表面洁净。所有的粒度细小的单斜辉石和部分粗粒单斜辉石属于此类。

角闪辉长岩中的角闪石从结构上分为 2 类:(1)与单斜辉石(Cpx II)共生的角闪石(以下简写为 Amp I),包括等粒结构样品中的角闪石和斑状结构样品基质中的角闪石;(2)交代单斜辉石的角闪石(Amp II)。

4 样品及分析测试方法

我们选取了 8 件角闪辉长岩样品、3 件辉长玢岩样品、1

表 1　角闪辉长岩锆石 SHRIMP 定年结果

Table 1　The zircon SHRIMP dating results of hornblende gabbro

测点号	$^{206}Pb_c$ (%)	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	$\frac{^{232}Th}{^{238}U}$	^{206}Pb ($\times10^{-6}$)	$\frac{^{238}U}{^{206}Pb}$	Error (%)	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	Error (%)	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	Error (%)	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$ Age(Ma)	Error (1σ) (Ma)	Discordant (%)
DB19-1.1	0.13	194	92	0.49	11.5	14.51	1.7	0.0565	2.1	0.53	3.8	429.2	7.3	1
DB19-2.1	1.59	92	39	0.44	5.6	14.22	1.8	0.0612	2.6	0.46	15.5	431.3	8.5	−285
DB19-3.1	0.00	272	165	0.62	100.2	2.33	1.6	0.1484	0.4	8.76	1.6	2299	30	1
DB19-5.1	0.94	163	70	0.44	9.7	14.46	1.7	0.0597	2.1	0.49	4.2	427.3	7.1	−47
DB19-5.2	0.45	147	71	0.50	8.8	14.30	1.8	0.0592	2.4	0.53	4.6	433.9	7.8	0
DB19-6.1	0.44	387	215	0.57	22.2	14.95	1.6	0.0581	1.4	0.50	2.4	415.5	6.4	−6
DB19-7.1	0.21	856	444	0.54	50.2	14.64	1.5	0.0567	1.0	0.52	2.5	425.0	6.4	−4
DB19-8.1	0.06	1162	64	0.06	57.1	17.50	1.6	0.0538	0.9	0.42	2.1	358.1	5.7	−5
DB19-9.1	0.26	580	18	0.03	57.1	150.7	1.5	0.1141	0.4	4.66	1.7	1701	23	7

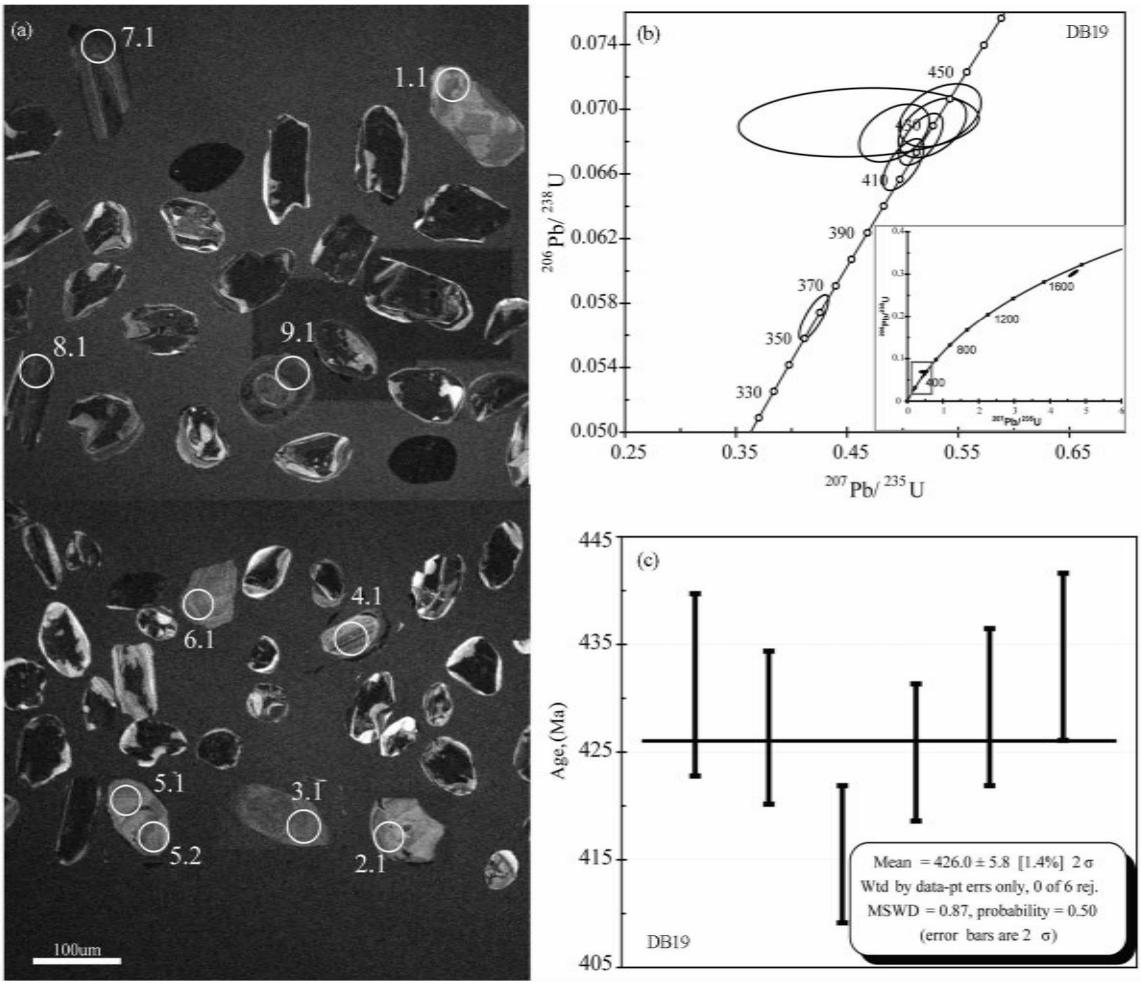


图 4　角闪辉长岩样品 DB19 锆石阴极发光图像(a)及定年结果(b, c)

Fig. 4　The cathodoluminescence (CL) images of zircons from sample DB19 (a) and zircon SHRIMP dating results for zircons from sample DB19 (b, c)

件辉长岩样品、11 件蛇纹石化的地幔岩样品进行了全岩微量元素 ICP-MS 测试。角闪辉长岩的样品包括 4 件层状构造样品，4 件块状构造样品(2 件为等粒结构，2 件为斑状结构)。对于层状构造的样品，我们将浅色条带(以斜长石为主的岩层)和深色条带分离后分别测试，由于角闪石层很薄，且含量很少，很难从深色条带中分离，我们选取的深色条带为角闪

表 2 全岩微量元素含量测定结果($\times 10^{-6}$)

Table 2 Representative compositions of trace elements ($\times 10^{-6}$) in rock samples

岩性	角闪辉长岩								辉长岩	辉长玢岩			方辉橄榄岩			
样品号	DB17**	DB18	DB20	DB22	HT77	HT79	HT76	HT 80	DB16	DB24	DB26	DB27	DLBT03	DLBT07	DLBT08	DLBT10
Cs	0.18	0.18	0.16	0.23	0.24	0.52	1.13	0.43	0.11	0.36	1.08	1.21	0.02	0.22	0.02	0.02
Rb	1.36	0.88	1.43	2.80	2.98	9.11	8.25	8.64	3.54	0.50	14.2	6.46	0.61	1.05	1.14	0.30
Ba	1188	584	563	446	45.9	207	448	371	224	2.62	91.3	69.6	6.20	121	5.72	12
Th	0.32	0.04	0.12	0.16	0.07	0.08	0.14	0.05	0.03	0.24	0.14	0.16	<0.01	0.03	0.01	0.02
U	0.13	0.04	0.08	0.11	0.12	0.04	0.15	0.03	0.03	0.13	0.06	0.10	0.02	0.14	0.02	0.01
Nb	0.74	1.29	1.02	1.09	0.86	0.90	1.48	0.81	0.43	1.33	0.74	0.69	0.29	0.21	0.27	0.25
Ta	0.09	0.06	0.07	0.07	0.09	0.13	0.26	0.10	0.21	0.10	0.06	0.09	<0.01	0.01	0.01	0.01
La	9.17	4.18	4.16	4.79	3.62	4.30	2.13	2.09	0.06	3.68	2.33	2.02	0.02	0.08	0.06	0.06
Ce	17.8	12.6	13.6	14.0	10.4	12.4	6.38	5.72	0.20	9.69	5.85	6.14	0.04	0.14	0.09	0.08
Pr	2.37	2.31	2.74	2.76	2.09	2.54	1.23	1.16	0.03	1.69	1.06	1.05	0.01	0.05	0.02	0.02
Pb	13.4	12.6	7.18	16.1	9.3	11.0	8.38	11.9	5.54	8.74	10.4	2.68	4.38	16.9	3.34	12.3
Sr	2726	2993	2544	1392	871	1699	1631	1175	100	360	210	232	11.7	277	16.0	10.2
Nd	8.78	11.6	12.9	13.7	11.5	13.2	7.22	6.29	0.14	9.05	5.93	5.50	0.09	0.17	0.08	0.30
Zr	70.1	33.9	47.8	44.3	44.9	49.1	44.8	47.2	5.32	73.0	83.6	114	1.06	25.0	0.64	0.85
Hf	2.12	1.49	2.03	1.96	1.67	1.81	1.58	1.59	0.14	2.23	2.95	2.26	0.04	1.05	0.04	0.04
Ti	1948*	4378*	4274*	3949*	5663*	5861*	4926*	4820*	46.22*	5271*	4781*	3338*	76.9	54.6	46.7	31.2
Sm	2.02	3.03	3.31	3.44	3.15	3.78	2.45	2.17	0.02	2.39	1.75	1.72	<0.01	0.02	<0.01	0.01
Eu	1.15	1.00	1.10	1.27	1.03	1.31	1.00	0.94	0.05	0.93	0.66	0.83	<0.01	0.04	<0.01	<0.01
Gd	1.25	2.43	2.80	3.05	3.10	3.82	2.35	2.24	0.10	2.67	1.81	2.24	0.01	0.02	0.02	0.02
Tb	0.17	0.46	0.58	0.60	0.65	0.75	0.55	0.53	0.02	0.57	0.43	0.44	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Dy	0.94	2.77	3.45	3.53	4.01	4.40	3.64	3.56	0.19	3.60	2.83	3.38	0.01	0.02	0.01	0.01
Y	4.78	14.5	18.1	18.1	21.2	24.5	19.2	19.5	0.88	19.9	15.4	18.6	0.21	0.19	0.09	0.12
Ho	0.19	0.56	0.72	0.77	0.86	0.96	0.82	0.78	0.03	0.79	0.64	0.65	0.01	0.01	0.01	0.01
Er	0.53	1.58	1.93	1.99	2.30	2.62	2.20	2.20	0.12	2.20	1.67	2.02	0.04	0.02	0.01	0.03
Tm	0.10	0.29	0.38	0.40	0.44	0.51	0.43	0.43	0.01	0.42	0.34	0.32	0.01	0.00	0	0.01
Yb	0.59	1.61	2.03	2.29	2.44	2.75	2.42	2.44	0.12	2.42	1.88	1.98	0.10	0.05	0.03	0.05
Lu	0.09	0.24	0.29	0.32	0.35	0.41	0.35	0.35	0.02	0.35	0.27	0.32	0.02	0.01	0.01	0.01
Cr	353	332	577	711	260	282	401	401	138	351	444	650	8232	4080	3850	2537
Ni	54	88.6	146	185	85.1	84	111	122	57.1	111	148	166	1275	2192	2231	1690
$(La/Ce)_N$	1.33	0.86	0.79	0.88	0.90	0.90	0.86	0.94	0.84	0.98	1.03	0.85	1.31	1.13	1.12	1.20
$(La/Yb)_N$	11.09	1.86	1.47	1.50	1.06	1.12	0.63	0.61	0.39	1.09	0.89	0.73	0.14	1.31	1.69	0.88

注: * 该数据由 XRF 获得; ** 该样品(DB17)为层状角闪辉长岩中的浅色条带

石与斜长石构成嵌晶结构的样品。全岩微量元素测试分析之前首先将样品破碎至 60 目,用玛瑙钵研磨至 200 目以下。微量元素分析过程中,粉末样品的溶离处理工作在北京大学地球与空间科学学院完成,使用北京核工业第三研究所 Finnigen Mat ICP-MS 仪器分析微量元素含量。针对不同岩性中单斜辉石、角闪石的矿物原位微量元素测试也是北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。该项测试选用的激光剥蚀系统为美国相干公司的 ComPex102ArF 准分子激光器(波长 193nm),激光束斑直径 60μm,激光能量密度 15J·cm^{-2},重复频率 5Hz,采样方式为单点剥蚀。ICP-MS 为美国安捷伦公司的 Agilent7500ce/cs 质谱仪,剥蚀物质的载气为 He 气,He 载气流速为 0.75L·min^{-1},采用美国国家标准技术研究院的 NIST610 标样进行仪器最佳化,当仪器达到最高灵敏度、最小氧化物产率、最低背景值后开始测定,以 Si 作内标。从角闪辉长岩样品(DB19)中分离出锆石,在北京离子探针中心完成 CL 图像,并用该中心的 SHRIMP Remote Operation System 在澳大利亚完成锆石 SHRIMP 定年。

5 锆石年代学

为确定达拉布特辉长岩的形成时代,从角闪辉长岩样品 DB19 中挑选出锆石进行 SHRIMP 年代学测试(表 1)。角闪辉长岩中的锆石分为 2 类,一类为典型的岩浆锆石,形状较为规则,表面洁净,裂隙较少,具有扇形结构或发育环带,其 Th/U 比值为 0.44~0.57,另一类锆石形态不规则,裂隙发育且含有许多包体,在 CL 图像下可见不规则的亮边,而内部则

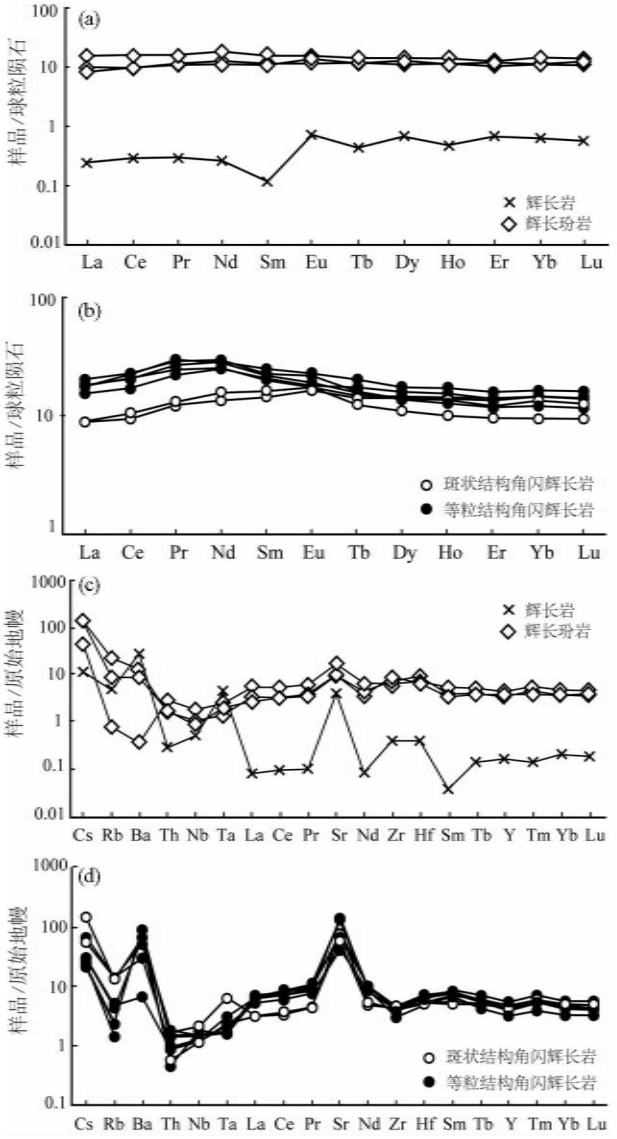


图 5 辉长岩、辉长玢岩及角闪辉长岩的稀土元素配分模式图(a, b)及微量元素蛛网图(c, d)(标准化数据据 Sun and McDonough,1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a, b) and primitive mantle normalized TE patterns (c, d) of gabbro, gabbro-porphyrite and hornblende gabbro (chondrite and primitive mantle values from Sun and McDonough, 1989)

极暗,表明其具有很高的 Th、U 含量(图 4a)。对于第一类锆石的测试表明除了 1 个测试点年龄较年轻外,其它的 6 个测试点的表观年龄在 415 ~ 433Ma 之间,加权平均年龄为 426 ± 5.8Ma(MSWD = 0.87)(图 4b, c)。选择具有核幔结构的锆石的幔部进行测试,得到 2 个年龄:~1700Ma(测点 9.1)和 ~2200Ma(测点 3.1),由于锆石粒径太小,测试结果可能为核幔混合年龄。暗色锆石在测试时无法避免亮边的混染,且 Th、U 含量很高,不符合 SHRIMP 测试要求,未获得测试数据。

6 全岩微量元素地球化学

全岩微量元素测试数据列于表 2。角闪辉长岩(不包括浅色条带样品)与辉长玢岩各元素丰度相近。角闪辉长岩中的浅色条带具有较高的 Ba 含量(1188×10^{-6}),较低的 Ti 含量(1948×10^{-6}),而其他元素丰度与同类样品差别不大。辉长岩的微量元素丰度普遍较低,稀土元素、高场强元素以及相容元素均低于角闪辉长岩和辉长玢岩。蛇纹石化的地幔岩除了相容元素(如 Ni、Cr)含量很高外,其他元素含量很低,蛇纹石化导致个别样品 Sr 含量高。在稀土元素球粒陨石标准化图解中(图 5a, b),角闪辉长岩样品的配分模式分为 2 类:(1)层状构造样品中的暗色条带和块状构造等粒结构的样品 $(La/Yb)_N > 1$,具有舒缓右倾的趋势,与 E-MORB 类似;(2)斑状结构样品轻稀土轻度亏损,$(La/Yb)_N < 1$,中-重稀土呈平坦分布,与 N-MORB 类似。辉长玢岩的稀土配分模式呈近平坦状,$(La/Yb)_N \approx 1$。辉长岩的稀土配分模式为轻稀土亏损型,$(La/Yb)_N = 0.39$,与 N-MORB 相似。在微量元素蛛网图中(图 5c, d),各岩石样品总体分布趋势相近,富集 Cs、Rb、Ba 这些大离子亲石元素,亏损 Th、Nb、Ta,具有 Sr 的正异常。层状构造样品中的深色条带具有 Zr 的相对亏损而 Nb/Ta(15 ~ 21)属于正常范围(原始地幔、MORB 中 Nb/Ta 均在 18 左右),而块状构造的角闪辉长岩和辉长玢岩表现出 Nb 亏损(Nb/Ta 分别在 7 ~ 10 和 7 ~ 13)。辉长岩微量元素丰度较低,具有 Zr、Hf 正异常。

7 矿物微量元素地球化学

利用激光剥蚀原位分析(LA-ICP-MS)得到的单斜辉石、角闪石的微量元素数据列于表 3。辉长岩中的单斜辉石微量元素分布没有明显的核边差异,部分元素的含量很低(如 Nb、Ta、Th、U)。个别测点的 Pb 含量较高,可能是混染了蚀变矿物。辉长玢岩中的单斜辉石斑晶具有核边的差异,核部微量元素丰度低,边部与基质中单斜辉石相似。角闪辉长岩中 Cpx I 具有较高的 Cr 含量($>3000 \times 10^{-6}$),明显高于 Cpx II($< 1000 \times 10^{-6}$)。角闪辉长岩中的 AmpI Ti 含量高($>10000 \times 10^{-6}$),Cr 含量低($< 1000 \times 10^{-6}$),Amp II 则具有较低的 Ti($<3000 \times 10^{-6}$)和较高的 Cr($>4000 \times 10^{-6}$)。

图 6a-c 分别表示的是辉长岩中单斜辉石的稀土元素、微量元素、过渡族金属元素的相关图解。辉长岩单斜辉石中的微量元素含量较低,这与全岩数据的特点一致。在稀土元素球粒陨石标准化图解中,轻—重稀土的分异较强,$(La/Yb)_N$ 平均值为 0.07。在单斜辉石核部与边部的比较中,除了一个位于核部的测试点元素含量偏低外,没有明显的差别。在微量元素蛛网图中,辉长岩中的单斜辉石表现出显著的 Nb、Zr 亏损,较弱的 Ti 的亏损,而在过渡族金属元素图解中呈舒缓右倾,Ti 呈弱亏损。

表 3 单斜辉石和角闪石中微量元素含量测定结果($\times 10^{-6}$, LA-ICP-MS)

Table 3 Representative compositions of trace elements in clinopyroxene and amphibole ($\times 10^{-6}$) by LA-ICP-MS

矿物	单斜辉石(辉长岩中)				单斜辉石(辉长玢岩中)				单斜辉石(角闪辉长岩中)				角闪石(角闪辉长岩中)			
Sc	58.98	45.67	100	50.07	87.51	80.07	64.88	81.44	104	105	114	93.74	97.63	96.20	66.63	62.97
Ti	906	581	1379	733	1293	1214	1406	2413	2350	2289	2531	1875	2273	2199	11900	11127
V	154	104	199	136	207	205	232	230	281	290	348	285	266	287	869	572
Cr	1662	1279	2676	1422	3000	2428	455	4.54	3449	3221	612	674	4148	4698	72.99	218
Co	36.46	42.82	35.44	35.49	35.19	36.02	40.43	46.50	39.75	36.58	32.43	32.38	43.25	42.72	70.07	71.30
Ni	142	180	130	123	195	203	144	37.16	128	124	105	86.97	103	98.73	152	166
Cs	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.186	<0.01	<0.01	0.013	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.060
Rb	0.12	0.06	0.05	0.03	0.04	0.08	0.03	0.97	0.21	0.24	0.42	0.06	0.18	0.14	0.85	0.99
Ba	1.33	1.11	0.99	0.78	0.38	0.40	0.18	1.47	2.95	2.40	1.53	0.26	2.66	2.27	24.09	23.24
Th	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
U	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Nb	0.02	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.08	0.14	0.08	0.03	<0.01	0.20	0.17	1.43	1.40
Ta	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0	0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	0.08	0.09
La	0.06	0.07	0.04	0.04	0.12	0.11	0.11	0.48	1.48	1.26	0.86	0.66	0.97	0.93	3.90	3.54
Ce	0.25	0.23	0.21	0.18	0.71	0.61	0.64	3.08	6.38	5.21	3.22	2.74	4.69	4.37	17.41	16.39
Pr	0.08	0.05	0.06	0.05	0.16	0.15	0.17	0.71	1.24	1.01	0.66	0.64	1.02	0.96	3.46	3.24
Pb	0.43	0.12	0.07	0.07	<0.01	0.03	<0.01	0.11	0.06	0.07	0.07	0.04	0.05	0.05	0.20	0.18
Sr	9.36	9.12	8.56	8.38	8.53	8.19	8.29	9.03	15.68	14.58	14.27	13.55	11.96	11.44	43.07	42.20
Nd	0.59	0.38	0.53	0.43	1.16	1.05	1.17	5.01	7.44	6.11	4.74	4.86	6.74	6.09	21.23	20.48
Zr	1.58	0.94	1.78	1.05	6.07	6.21	4.39	20.59	20.01	15.85	13.41	18.64	23.82	22.84	84.02	76.89
Hf	0.13	0.08	0.15	0.08	0.37	0.32	0.20	0.85	0.66	0.65	0.72	0.96	0.56	0.56	3.53	2.84
Sm	0.39	0.22	0.42	0.27	0.65	0.65	0.66	2.31	2.60	2.29	2.14	2.14	2.43	2.10	6.90	6.66
Eu	0.16	0.09	0.15	0.13	0.27	0.26	0.27	0.73	0.83	0.75	0.70	0.70	0.68	0.63	2.06	1.88
Gd	0.58	0.43	0.93	0.42	0.93	0.84	0.88	3.11	2.77	2.48	2.68	2.51	2.45	2.19	7.16	6.57
Tb	0.13	0.08	0.23	0.10	0.19	0.16	0.17	0.61	0.48	0.45	0.46	0.44	0.43	0.41	1.21	1.06
Dy	0.95	0.60	1.89	0.70	1.22	1.13	1.24	4.19	3.11	2.87	3.09	2.80	2.76	2.57	7.44	6.83
Y	5.27	3.08	10.17	3.71	6.55	6.02	6.16	21.17	15.12	13.49	13.40	12.69	14.48	13.33	38.94	35.76
Ho	0.22	0.13	0.43	0.16	0.27	0.25	0.25	0.91	0.66	0.58	0.61	0.59	0.56	0.54	1.56	1.42
Er	0.58	0.36	1.28	0.38	0.67	0.67	0.69	2.46	1.77	1.57	1.62	1.54	1.66	1.57	4.32	3.98
Tm	0.08	0.05	0.19	0.06	0.09	0.10	0.10	0.32	0.24	0.21	0.22	0.20	0.24	0.22	0.59	0.53
Yb	0.60	0.36	1.23	0.46	0.71	0.60	0.65	2.35	1.83	1.55	1.35	1.47	1.72	1.67	4.33	3.96
Lu	0.08	0.05	0.15	0.06	0.09	0.08	0.08	0.31	0.27	0.23	0.19	0.20	0.26	0.23	0.59	0.58

辉长玢岩的单斜辉石斑晶和基质具有一致的微量元素配分模式(图 6d, e),$(La/Yb)_N$ 比值平均 0.14,亏损 Nb、Sr、Zr、Ti。单斜辉石的元素丰度有一定的变化范围,特别是在斑晶中表现出明显的核-边的差异。在稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素蛛网解中,元素含量从核部到边部都表现出逐渐升高的特点,而在过渡族金属元素图解中,核部与边部的显著差异表现为 Cr 元素从不亏损到强烈亏损(图 6f)。

在角闪辉长岩中,Cpx I 和 Cpx II 具有近似的稀土元素、微量元素配分模式(图 6g, h)。在稀土元素球粒陨石标准化图解中,La、Ce 相对亏损,Pr、Sm、Nd 呈富集上拱状,中—重稀土呈平坦分布。Cpx I 的 $(La/Yb)_N$ 平均为 0.53,Cpx II 的 $(La/Yb)_N$ 平均为 0.44。在微量元素蛛网图中都具有 Th、Nb、Ti、Zr、Hf、Pb、Sr 的亏损。在过渡族元素图解中(图 6i),Cpx I 呈舒缓右倾,Ti 弱亏损,而 Cpx II 具有强烈的 Cr 亏损。角闪石的稀土元素配分模式与单斜辉石相似(图 6j),其中交代成因的角闪石(Amp II)与单斜辉石基本一致,而 Amp I 具有较高的元素丰度。单斜辉石、角闪石的稀土元素配分模式与全岩数据也十分相似,这表明全岩的 REE 组成基本受单斜辉石和角闪石控制。在微量元素蛛网图中角闪石均亏损 Th、Pb、Sr、Zr、Hf、Ti(图 6k)。在过渡族元素图解中(图 6l),交代成因的角闪石贫 Ti 而无 Cr 的亏损,嵌晶状的角闪石则强烈亏损 Cr。

8 讨论

8.1 岩浆源区性质

辉长岩、辉长玢岩和角闪辉长岩均呈不规则块体混杂在蛇纹石化的地幔岩中,组成了达拉布特蛇绿混杂岩。辉长岩中的单斜辉石发生塑性变形,这一现象在地幔岩中普遍存在,这表明它们共同经历了深部的变形作用。辉长岩的异剥钙榴岩化与地幔岩的蛇纹石化可能是同时发生的洋底变质反应。角闪辉长岩和辉长玢岩的变形较弱,变质程度与辉长

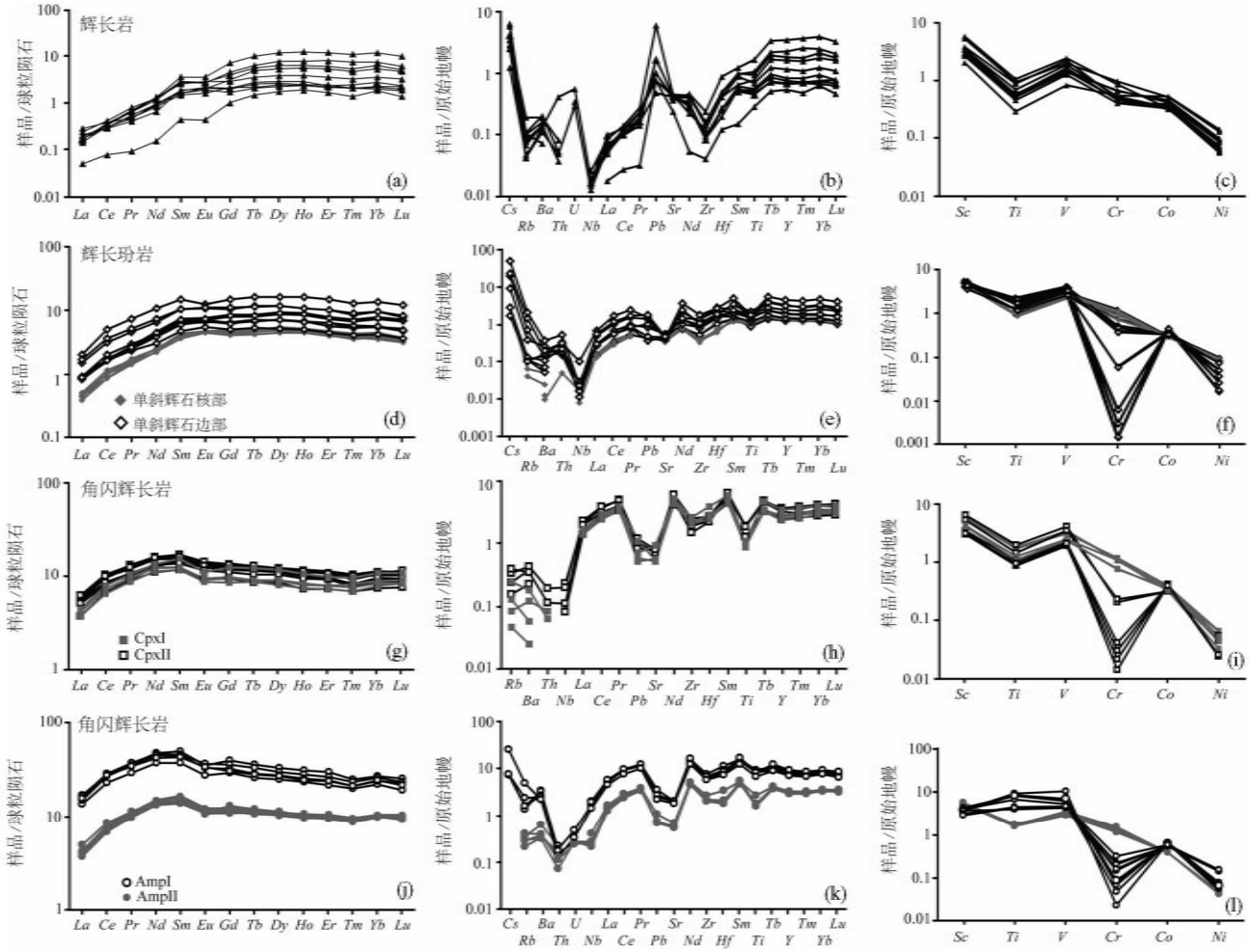


图 6　辉长岩、辉长玢岩及角闪辉长岩中单斜辉石及角闪石稀土配分模式图、微量元素蛛网图及过渡族元素标准化图解（标准化数据据 Sun and McDonough，1989）

(a-c)-辉长岩中单斜辉石；(d-f)-辉长玢岩中单斜辉石；(g-i)-角闪辉长岩中单斜辉石；(j-l)-角闪辉长岩中角闪石

Fig. 6　Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized TE patterns of clinopyroxene and amphibole in gabbro (a-c), gabbro-porphyrite (d-f) and hornblende gabbro (g-i, j-l) (chondrite and primitive mantle values from Sun and McDonough, 1989)

岩相当（绿片岩相）。达拉布特蛇绿岩带中的地幔岩富铬，萨尔托海铬铁矿床位于该蛇绿岩带内，且地幔岩中普遍存在铬尖晶石与辉石的共生连晶结构（陈博和朱永峰，2008）。各类基性侵入岩也表现出富铬的特点：在变质作用下，辉长岩中形成了含钙铬榴石端元的石榴石；角闪辉长岩 Cpx I 中发育富铬的尖晶石族矿物；辉长玢岩中含有铬铁矿包体，这说明这些基性侵入岩都来源于富铬的源区。在稀土元素球粒陨石标准化图解中，各类岩石均具有 MORB 型的分布模式（层状角闪辉长岩近似于 E-MORB），在微量元素蛛网图中配分模式也较为相近。La、Ce 的分配系数相近，La/Ce 受熔融和分离结晶过程的影响较弱，能够反应岩浆源区的信息，而 La/Yb 的变化则体现岩浆演化的过程。在表 2 中，各样品 $(La/Ce)_N$ 相近（0.79～1.03），表明辉长岩、辉长玢岩、角闪辉长岩的源区性质相似，而 $(La/Yb)_N$ 从辉长岩（0.39）到辉长玢岩（平均值为 0.90）、角闪辉长岩（平均值为 1.18）逐步升高，这表明该岩浆经历了从轻稀土强烈亏损到轻重稀土分异较弱再到轻稀土弱富集的过程。Sm、Y 在玄武质熔体与单斜辉石之间的分配系数相近，因此 Sm/Y 的性质与 La/Ce 相似，受分离结晶过程影响较弱。以单斜辉石 $(La/Ce)_N$、Sm/Y 分别与 $(La/Yb)_N$ 作图可得到相同结论。图 7a，b 包含了来自 3 类岩石的单斜辉石数据，并且辉长岩和辉长玢岩中区分核部和边部，角闪辉长岩的数据区分了 Cpx I 和 Cpx II 2 类单斜辉石。辉长岩中的单斜辉石从核部到边部 $(La/Ce)_N$、$(La/Yb)_N$ 均有较大的变化范围，而 Sm/Y 的变化范围很小，辉长玢岩中的单斜辉石从核部到边部 $(La/Ce)_N$、Sm/Y 相近，$(La/Yb)_N$ 变化相对较宽，角闪辉长岩中从 Cpx II 到 Cpx I 的单斜辉石 $(La/Yb)_N$ 变化很大，$(La/Ce)_N$、Sm/Y 则变化较小。从 3 类岩石的关系来看，从辉长岩（以辉长岩单斜辉石

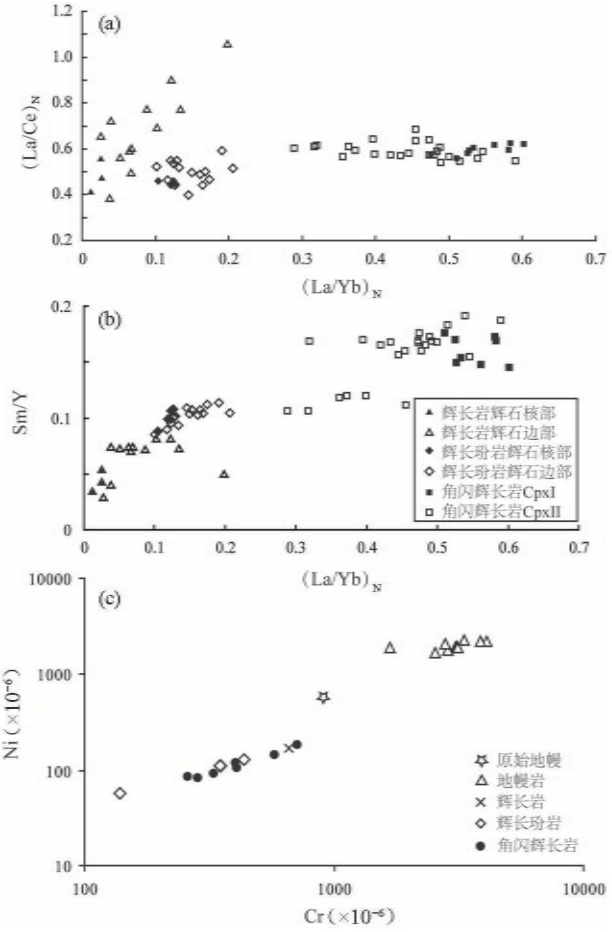


图 7 辉长岩、辉长玢岩、角闪辉长岩中单斜辉石微量元素比值图解(a, b)和各类岩石中 Ni-Cr 图解(c)

Fig. 7 The co-variation of trace element ratios from clinopyroxene of gabbro, gabbro-porphyrite and hornblende gabbro (a, b) and Ni- Cr composition in these rocks (c)

核部代表其形成时的条件)到辉长玢岩、角闪辉长岩,其单斜辉石 $(La/Ce)_N$、Sm/Y 相近,而 $(La/Yb)_N$ 则变化大,这也说明它们源区相似却又是演化阶段不同的产物。

达拉布特地幔岩的主体为蛇纹石化的方辉橄榄岩,代表着地幔发生一定程度部分熔融的残余体。Ni、Cr 在部分熔融和分离结晶过程为相容元素,且不易受变质作用影响。在 Ni-Cr 图解(图 7c)中,蛇纹石化的地幔岩高于未亏损地幔区域,表现出残余富集的特征。各基性侵入岩 Ni-Cr 之间具有较好的相关性,这些特点表明它们存在岩浆演化的联系。我们以前人提供的该地区尖晶石二辉橄榄岩为源区,通过部分熔融过程稀土元素的地球化学行为对该过程进行模拟。尖晶石二辉橄榄岩的矿物组成为:橄榄石(60%)、斜方辉石(25%)、单斜辉石(13%)、尖晶石(2%)(师占义和李金铭,1987),假设各矿物在熔融过程中的贡献分别为橄榄石:5%,斜方辉石:20%,单斜辉石:65%,尖晶石:10%。经过模拟计算,该尖晶石二辉橄榄岩发生约 15% 部分熔融形成的残余体与方辉橄榄岩在中-重稀土的配分模式上吻合,轻稀土则相差较大(图 8a)。达拉布特方辉橄榄岩的稀土模式具有 U 型分布特点,这种稀土配分模式在与蛇绿岩相关的超基性岩体中十分普遍,其形成原因可能与蛇纹石化有关,也可能是后期熔体的富集交代或是二次重熔(Navon and Stolper, 1987; Gruau *et al.*, 1998; Mecher *et al.*, 2002),这些过程对轻稀土的分布模式影响较大,但重稀土和 Ti 仍然受控于熔融过程(Proenza *et al.*, 1999)。以上模拟过程中所展示出来的中-重稀土的吻合,说明方辉橄榄岩是二辉橄榄岩发生 15% 部分熔融的残余。Ti、Yb 在部分熔融与分离结晶过程中为不相容元素,且不易受蚀变作用影响。图 8b 为尖晶石二辉橄榄岩经历不同程度部分熔融形成的残留体的 Ti-Yb 图解,与稀土元素的模拟相似,方辉橄榄岩的数据落入二辉橄榄岩发生 10% ~15% 熔融的残留体范围内。以尖晶石二辉橄榄岩发生 15% 形成的熔体为母岩浆,对基性侵入岩进行的模拟计算(图 8c, d)表明,辉长岩位于分离结晶演化线上,而角闪辉长岩、辉长玢岩位于分离结晶的残余熔体演化线上。因此,辉长岩为早期分离结晶的产物,角闪辉长岩、辉长玢岩为剩余岩浆的结晶产物,这与岩相学特点吻合。

8.2 蛇绿岩形成时代

角闪辉长岩中分选出了 2 类锆石:典型岩浆锆石(形状规则,CL 图象显示扇形结构或环带,Th/U 比值 0.44 ~0.57)和退晶化锆石(形态不规则,裂隙发育且含有许多包体,CL 图像显示不规则亮边,而内部极暗,图 4a)。岩浆锆石的 SHRIMP 测试结果(426 ±5.8Ma)代表角闪辉长岩岩浆的结晶年龄。退晶化锆石具不规则亮边,表明这些锆石受到变质流体的改造。对该类锆石的测试能获得角闪辉长岩的变质年龄。仅测得一个表观年龄为 358Ma 的锆石(测点 8.1,Th/U =0.06),这颗锆石发育微弱的岩浆环带,且有很窄的亮边,应该代表锆石结晶年龄与变质年龄的混合。由于变质锆石边很窄,无法测定变质锆石的 U-Pb 年龄。变质过程以及流体过程可以对锆石产生明显的改造,并破坏其同位素体系,导致锆石 U-Pb 年代学的复杂性(Zhu, 2011)。进一步对这种复杂的锆石开展系统研究,将有助于我们了解该蛇绿岩带的岩浆演化特征。本文的工作表明,达拉布特辉长岩经历了复杂的地质过程,从角闪辉长岩中挑选的岩浆锆石获得的定年结果表明,达拉布特蛇绿岩所代表的古洋盆在中志留世就已经存在,该洋盆一直演化到中晚泥盆世。

9 结论

出露于达拉布特蛇绿混杂岩带中辉长岩、辉长玢岩和角闪辉长岩均呈不规则块体状分布在蛇纹石化地幔岩中,尽管它们具有不同的岩石学和地球化学特征,但它们是同源岩浆演化的产物。地幔源区(尖晶石二辉橄榄岩)发生 15% 部分熔融后形成了高度亏损的方辉橄榄岩,所产生的熔体通过分

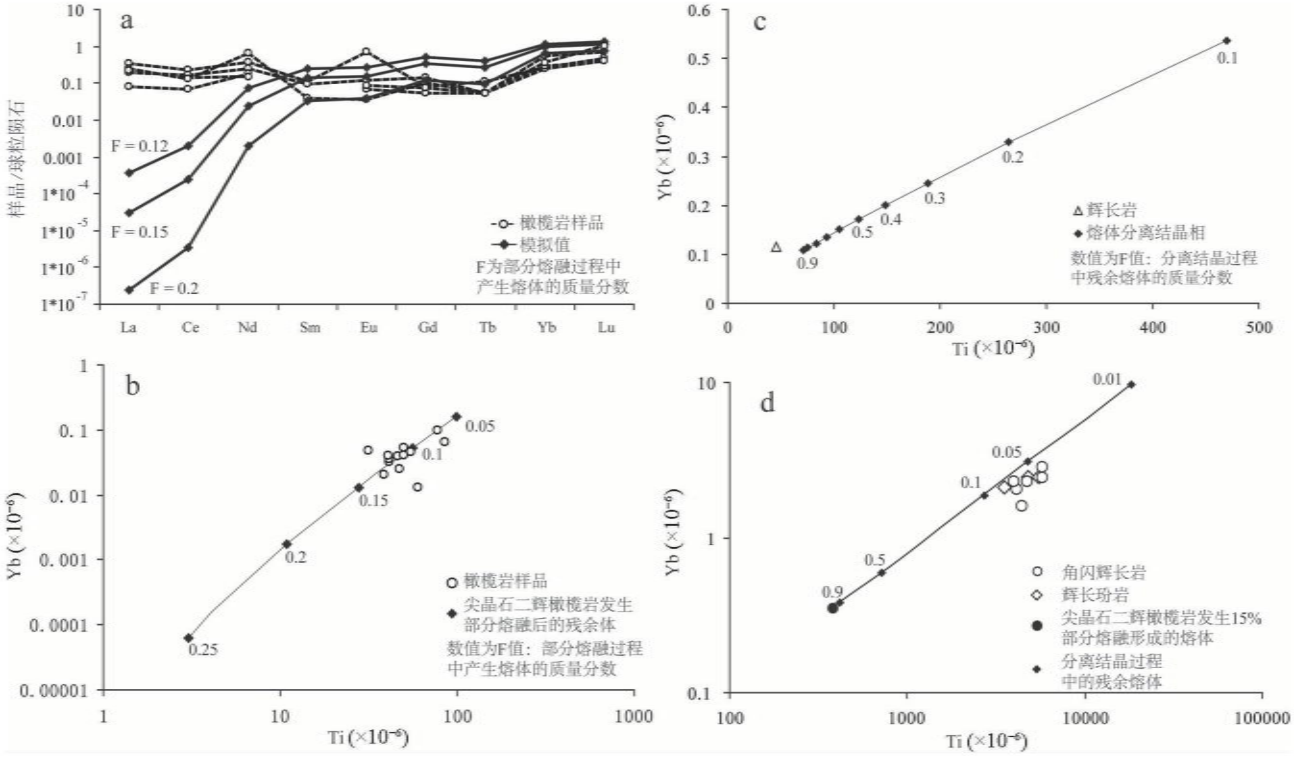


图 8　达拉布特蛇绿岩岩浆过程模拟

(a、b)-利用稀土元素和 Yb-Ti 元素对模拟地幔橄榄岩熔融过程；(c、d)-岩浆分离结晶作用模拟，以达拉布特地区尖晶石二辉橄榄岩(据师占义和李金铭，1987)为地幔源区，分配系数来自(据 Rollison，1993)

Fig. 8　Calculated results of magma process of Darbut ophiolite

(a, b)-calculated chondrite-normalized REE patterns and Yb-Ti variation of melting process of peridotite; (c, d)-calculated results of magma fractional crystallization, Darbut spinel-lherzolite (after Shi and Li, 1987) is used as mantle source, partition coefficients are from Rollison (1993)

离结晶形成了辉长岩，而剩余熔体结晶形成辉长玢岩和角闪辉长岩。锆石 U-Pb 定年显示，角闪辉长岩的结晶年龄为 426 ±6Ma，说明达拉布特所代表的古洋盆在中志留世就已存在。

致谢　电子探针分析得到中国科学院地质与地球物理研究所毛骞博士的协助；两名匿名审稿人提出的建设性修改意见和建议对帮助我们完善本文有重要帮助，特此感谢。

References

An F and Zhu YF. 2009. SHRIMP U-Pb zircon ages of the tuff in Baogutu Formation and their geological significances. Acta Petrologica Sinica, 25(6): 1437 – 1445 (in Chinese with English abstract)

Bai WJ, Ren YX, Wang SR and Lebel L. 1986. Petology, mineralogy and chromite deposits of the ophiolites in the Hongguleleng area, Xinjiang, China. Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 14: 1 – 60 (in Chinese with English abstract)

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 782 (in Chinese)

Chen B and Zhu YF. 2008. Petrology of ultramafic rock in Darbut ophiolite (Xinjiang): Evidence from Cr-spinel. Earth Science Frontiers, 15(6): 312 – 322 (in Chinese with English abstract)

Chen S and Guo ZJ. 2010. Time constraints, tectonic setting of Dalabute ophiolitic complex and its significance for Late Paleozoic tectonic evolution in West Junggar. Acta Petrologica Sinica, 26(8): 2336 – 2344 (in Chinese with English abstract)

Dong LH, Zhu ZX, Qu X, Wang KZ and Zhao TY. 2010. Spatial distribution, geological features and latest research progress of the main ophiolite zones in Xinjiang, NW-China. Acta Petrologica Sinica, 26(10): 2894 – 2904 (in Chinese with English abstract)

Fen YM. 1986. Genetic environments and original types of ophiolites in west Junggar. Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 13: 37 – 45 (in Chinese with English abstract)

Gruau G, Bernard-Griffiths J and Lecuyer C. 1998. The origin of U-shaped rare earth patterns in ophiolite peridotites: Assessing the role of secondary alteration and melt/rock reaction. Geochim. Cosmochim. Acta, 62: 3545 – 3560

Guo LS, Liu YL, Wang ZH, Song D, Xu FJ and Su L. 2010. The zircon U-Pb LA-ICP-MS geochronology of volcanic rocks in Baogutu areas, western Junggar. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 471 – 477 (in Chinese with English abstract)

Gu PY, Li YJ, Zhang B, Tong LL and Wang JN. 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Darbut ophiolite, western Junggar, China. Acta Petrologica Sinica, 25(6): 1364 – 1372 (in Chinese with English abstract)

He GQ, Liu JB, Zhang YQ and Xu X. 2007. Keramay ophiolitic mélange formed during Early Paleozoic in western Junggar basin. Acta Petrologica Sinica, 23: 1573 – 1576 (in Chinese with English abstract)

Liu XJ, Xu JF, Wang SQ, Hou QY, Bai ZH and Lei M. 2009. Geochemistry and dating of E-MORB type mafic rocks from the Dalabute ophiolite in West Junggar, Xinjiang and geological implications. Acta Petrologica Sinica, 25: 1373 – 1389 (in Chinese with English abstract)

Mecher F, Meisel T, Puhl J and Koller F. 2002. Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: Constraints from geochemistry. Lithos, 65: 69 – 112

Navon O and Stolper E. 1987. Geochemical consequences of melt percolation: The upper mantle as a chromatographic column. J. Geol., 95: 285 – 307

Proenza J, Gervilla F, Melgarejo JC and Bodinier JL. 1999. Al-rich and Cr-rich chromitites from the Mayarí-Baracoa ophiolitic belt (eastern Cuba): Consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotites in suprasubduction mantle. Econ. Geol., 94: 547 – 566

Rollison HR. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. New York: Longman Scientific and Technical, 1 – 352

Shi ZY and Li JM. 1987. The study of petrological and mineralogical characteristics and their metallogenic condition in western Junggar of Xinjiang, China. Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 17: 65 – 116 (in Chinese with English abstract)

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotope systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saybders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Oceanic Basins. Geological Society of London, Special Publication, 42: 313 – 345

Wang R and Zhu YF. 2007. Geology of the Baobei gold deposit in western Junggar and zircon SHRIMP age of its wall-rocks, western Junggar (Xinjiang, NW China). Geological Journal of China Universities, 13: 590 – 602 (in Chinese with English abstract)

Xu X, He GQ, Li HQ, Ding TF, Liu XY and Mei SW. 2006. Basic characteristics of the Karamay ophiolitic mélange, Xinjiang, and its zircon SHRIMP dating. Geology in China, 33: 470 – 475 (in Chinese with English abstract)

Zhang C and Huang X. 1992. The ages and tectonic settings of ophiolites in West Junggar, Xinjiang. Geological Review, 38: 509 – 523 (in Chinese)

Zhu BQ, Wang LS and Wang LX. 1987. Paleozoic Era ophiolite of southwest part in western Junggar, Xinjiang, China. Bulletin of the Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences, 17: 3 – 64 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF and Xu X. 2006. The discovery of Early Ordovician ophiolite melange in Taerbahatai Mts., Xinjiang, NW China. Acta Petrologica Sinica, 22(12): 2833 – 2842 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF. 2011. Zircon U-Pb and muscovite $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of the gold-bearing Tianger mylonitized granite, granite, Xinjiang, Northwest China: Implications for radiometric dating of mylonitized magmatic rocks. Ore Geology Reviews, doi: 10.1016/j.oregeorev.2011.05.007

附中文参考文献

安芳, 朱永峰. 2009. 新疆西准噶尔包古图组凝灰岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. 岩石学报, 25(6): 1437 – 1445

白文吉, 任有祥, 王书蓉, 勒贝尔 L. 1986. 新疆洪古勒楞蛇绿岩岩石学、矿物学和铬铁矿成因研究. 中国地质科学院地质研究所所刊, 14: 1 – 60

陈博, 朱永峰. 2008. 新疆达拉布特超镁铁岩成因——来自铬尖晶石的证据. 地学前缘, 15(6): 312 – 322

陈石, 郭召杰. 2010. 达拉布特蛇绿岩带的时限和属性以及对西准噶尔晚古生代构造演化的讨论. 岩石学报, 26(8): 2336 – 2344

董连慧, 朱志新, 屈迅, 王克卓, 赵同阳. 2010. 新疆蛇绿岩带的分布、特征及研究新进展. 岩石学报, 26(10): 2894 – 2904

冯益民. 1986. 西准噶尔蛇绿岩生成环境及其成因类型. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 13: 37 – 45

辜平阳, 李永军, 张兵, 佟丽莉, 王军年. 2009. 西准达尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年. 岩石学报, 25(6): 1364 – 1372

郭丽爽, 刘玉琳, 王政华, 宋达, 许发军, 苏犁. 2010. 西准噶尔包古图地区地层火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究. 岩石学报, 26(2): 471 – 477

何国琦, 刘建波, 张越迁, 徐新. 2007. 准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂岩带的厘定. 岩石学报, 23: 1573 – 1576

刘希军, 许继峰, 王树庆, 候青叶, 白正华, 雷敏. 2009. 新疆西准噶尔达拉布特蛇绿岩 E-MORB 型镁铁质岩的地球化学、年代学及其地质意义. 岩石学报, 25(6): 1373 – 1389

师占义, 李金铭. 1987. 西准噶尔地区超基性岩岩石矿物特征及成矿条件. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 17: 65 – 116

王瑞, 朱永峰. 2007. 西准噶尔宝贝金矿地质与容矿火山岩的锆石 SHRIMP 年龄. 高校地质学报, 13: 590 – 602

新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 782

徐新, 何国琦, 李华芹, 丁天府, 刘兴义, 梅绍武. 2006. 克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息. 中国地质, 33: 470 – 475

张弛, 黄萱. 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨. 地质论评, 38: 509 – 523

朱宝清, 王来生, 王连晓. 1987. 西准噶尔西南地区古生代蛇绿岩. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 17: 3 – 64

朱永峰, 徐新. 2006. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩. 岩石学报, 22(12): 2833 – 2842