

doi: 10.12029/gc20170211

黄岗, 牛广智, 王新录, 郭俊, 宇峰. 2017. 东准噶尔卡拉麦里蛇绿混杂岩中斜长角闪岩的发现与洋中脊构造环境的确认[J]. 中国地质, 44(2): 358-370.

Huang Gang, Niu Guangzhi, Wang Xinglu, Guo Jun, Yu Feng. 2017. The discovery of the amphibolite in the Kalamaili ophiolitic mélange formed in mid-oceanic ridge setting[J]. Geology in China, 44(2): 358-370(in Chinese with English abstract).

东准噶尔卡拉麦里蛇绿混杂岩中斜长角闪岩的发现 与洋中脊构造环境的确认

黄岗 牛广智 王新录 郭俊 宇峰

(陕西区域地质矿产研究院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 在新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿混杂带中新发现了斜长角闪岩, 主要呈透镜状夹持于变质橄榄岩之中。采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法, 获得斜长角闪岩锆石 U-Pb 年龄为 (402.7 ± 4.9) Ma, 表明其原岩形成时代为早泥盆世。岩相学、岩石地球化学及 Sr-Nd 同位素分析表明, 斜长角闪岩的原岩可能为变辉长岩, 样品 SiO_2 含量为 47.58%~50.57%, MgO 含量为 8.04%~9.12% 及对应的 $\text{Mg}^\#$ 值为 63.89~67.64, Ni 和 Cr 含量分别为 68.9×10^{-6} ~ 99.2×10^{-6} 和 306×10^{-6} ~ 398×10^{-6} , 与洋中脊拉斑玄武岩一致。稀土元素配分曲线呈弱亏损型至平坦型, 微量元素蛛网图总体与 N-MORB 相似, 无明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 及 Ti 的亏损, 各元素的丰度也与 N-MORB 接近。样品均具有较高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (8.7~9.2), 表明其原始岩浆来源于亏损地幔。在 TiO_2 - FeO_7/MgO 和 Th-Ta-Hf/3 构造环境判别图解中, 所有样品均落入洋中脊玄武岩区域内。结合区域地质构造背景, 认为斜长角闪岩可能形成于洋中脊构造环境, 代表了被肢解的古洋盆岩石圈残片, 应为卡拉麦里蛇绿混杂岩的组成部分, 揭示了该洋盆的开启时限至少可追溯至早泥盆世。

关键词: 卡拉麦里蛇绿混杂岩; 斜长角闪岩; Sr-Nd 同位素; MORB; 东准噶尔

中图分类号: P588.145; P542.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)02-0358-13

The discovery of the amphibolite in the Kalamaili ophiolitic mélange formed in mid-oceanic ridge setting

HUANG Gang, NIU Guangzhi, WANG Xinglu, GUO Jun, YU Feng

(Regional Institute of Shaanxi Bureau of Geological Exploration, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: The amphibolite, which is lenticular in shape and is wrapped in metamorphic peridotites, was discovered in the Kalamaili ophiolitic mélange belt, East Junggar, Xinjiang. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the amphibolite yielded an age of (402.7 ± 4.9) Ma, indicating that it was formed in Early Devonian. Petrographic, whole-rock chemical and Sr-Nd isotopic data suggest that the source rocks of the amphibolites were probably the meta-gabbro. The rock samples have SiO_2 , MgO and $\text{Mg}^\#$ values of 47.58%~50.57%, 8.04%~9.12% and 63.89~67.64, respectively. They also have Ni and Cr values of 68.9×10^{-6} ~ 99.2×10^{-6} and 306×10^{-6} ~ 398×10^{-6} . All these geochemical data are similar to the average value of MORB. The REE of the rocks show weak depletion to flattening

收稿日期: 2016-03-09; 改回日期: 2016-04-26

基金项目: 中国地质调查局项目 (1212011120500) 和中央返还两权价款资金项目 (Y15-1-LQ02) 联合资助。

作者简介: 黄岗, 男, 1984 年生, 工程师, 研究方向: 造山带岩浆作用研究及区域地质矿产调查; E-mail: huangg523@163.com。

pattern. The features of the trace elements of the rocks are similar to those of the N-MORB, suggesting no obvious depletion of Nb, Ta, Zr, Hf and Ti. The samples have high $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values varying from 8.7 to 9.2, suggesting that the original magma of the rocks was derived from the depleted mantle. On the TiO_2 versus FeO_T/MgO and Th versus Ta versus Hf/3 diagrams, all samples fall in the MORB field. Combined with the geological background, the authors hold that the amphibolite was probably formed in a mid-oceanic ridge setting and represented the lithosphere fragments of the dismembered ancient ocean basin, being a part of the Kalamaili ophiolitic mélange. This research reveals that the opening time of the Kalamaili ocean basin was the Early Devonian at least.

Key words: Kalamaili ophiolitic mélange; amphibolite; Sr-Nd isotope; MORB; East Junggar

About the first author: HUANG Gang, male, born in 1984, bachelor and engineer, engages in the study of magmatism of orogenic belts and regional geological analysis, E-mail: huangg523@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 1212011120500) and Central Return Two Right Price Capital Program (No. Y15-1-LQ02).

1 引言

新疆东准噶尔造山带作为中亚造山带的重要组成部分,其古生代的构造格局及洋盆演化与中亚造山带的形成过程密切相关,被认为是古生代时期古亚洲洋扩张、俯冲、增生杂岩和岩浆弧等地体的拼贴碰撞过程形成的增生型造山带(Xiao et al., 2004, 2008; Long et al., 2012; 徐学义等, 2014)。然而,对该造山带古生代以来的构造演化迄今尚未形成共识,尤其是对其中蛇绿岩的形成时代、构造属性与就位环境等方面存在争议。位于新疆准噶尔盆地东北缘的卡拉麦里蛇绿混杂岩带为东准噶尔造山带重要的组成部分,查清其构造属性对于了解和认识东准噶尔造山带古生代洋陆格局和构造演化历史具有重要的意义。前人对该蛇绿混杂岩带做了大量的研究,但在洋盆形成时限和闭合时限仍存在争议,如形成时限方面存在奥陶纪(何国琦等, 2001)、志留纪末期至泥盆纪早期(李锦轶等, 1995; 胡朝斌等, 2014; 方爱民等, 2015)和泥盆纪末期或石炭纪早期(舒良树和王玉净, 2003; 唐红峰等, 2007; 汪帮耀等, 2009)3种不同的认识。洋盆的闭合时限也有晚泥盆世(王富明等, 2014; 田健等, 2015)和早石炭世(李锦轶, 1989; 吴润江等, 2009; 王勇等, 2014; Xu et al., 2015)两种认识。笔者最近获得卡拉麦里蛇绿岩中辉绿岩年龄为(416.7±3.2) Ma, 代表了卡拉麦里蛇绿岩的形成年龄;不整合于蛇绿岩之上的地层中凝灰岩年龄为(343.0±5.0) Ma, 限定了卡拉麦里蛇绿岩侵位年龄的上限,从而提出卡拉麦里蛇绿岩所代表的古大洋在早泥盆世洛霍考夫

期前已开启,而闭合于早石炭世杜内期前(黄岗等, 2012)。

笔者在该区进行的1:25万北塔山牧场幅、滴水泉幅修测工作时,首次在卡拉麦里蛇绿岩混杂岩带中发现了斜长角闪岩,在野外地质填图的基础上,对其岩相学、岩石地球化学、Sr-Nd同位素及年代学开展了详细的研究,有效地揭示了该斜长角闪岩的形成环境及其指示的大地构造意义,这对于深入理解和研究卡拉麦里蛇绿混杂岩的形成时限和东准噶尔及其邻区区域构造演化均具有重要的意义。

2 地质背景

卡拉麦里蛇绿混杂带位于中亚造山带西部的新疆准噶尔盆地的东北缘(图1a、b),在区域上东与塔克扎勒蛇绿岩混杂带相连,向西潜入准噶尔盆地,被第四系覆盖,出露长度数百千米,宽度10~15 km,主要分布于卡拉麦里大断裂的北侧(图1c)。野外详细的调查表明,该蛇绿混杂带由蛇绿岩残片、上覆岩系、外来岩片等构造块体和变形基质两大部分组成,其中各肢解蛇绿岩残片多以断裂为界混杂堆叠,受剪切作用明显,岩块原生构造被后期构造改造或置换,但蛇绿岩的各组成单元出露仍较为齐全,包括变质橄榄岩、超镁铁质堆晶岩、辉长质杂岩、浅色岩系、基性岩墙群和镁铁质火山岩,其中变质橄榄岩主要为纯橄岩、二辉橄岩、方辉橄岩等,超镁铁质堆积岩由橄辉岩、单斜辉岩组成,辉长质杂岩由堆晶辉长岩、均质辉长岩等组成,浅色岩系主要为斜长花岗岩、闪长岩、斜长岩等,镁铁质火山岩主要为枕状玄武岩和块状玄武岩等;上

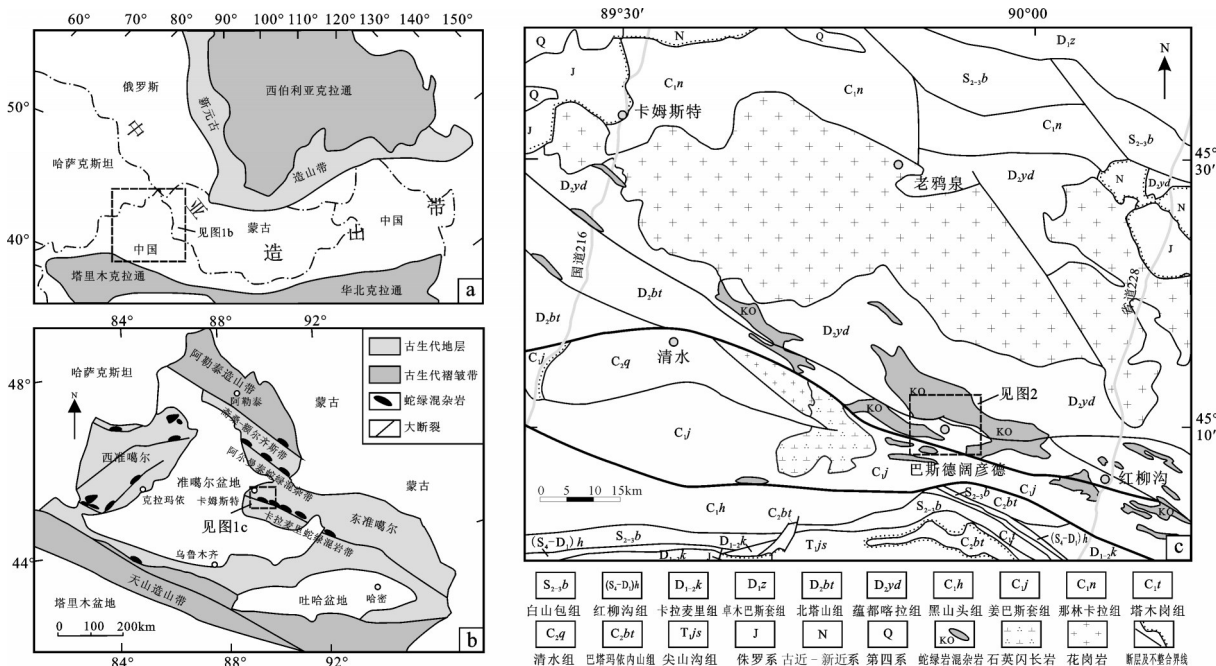


图1 研究区大地构造位置简图及区域地质简图

a—中亚造山带构造简图(据Şengör and Natal'in, 1996); b—准噶尔地块地质简图(据 Chen and Jahn, 2004);
c—新疆东准噶尔卡拉麦里一带地质简图(据资料①修改)

Fig. 1 Simplified tectonic geological map and regional geological sketch map

a—Tectonic map of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) (after Şengör and Natal'in, 1996), b—Simplified geological map of the Junggar terrane (after Chen and Jahn, 2004) and c—Simplified geological map of Karamaili area in eastern Junggar in northern Xinjiang (modified after reference①)

覆岩系主要为与蛇绿岩残片密切相伴的放射虫硅质岩及洋岛(碱性)玄武岩等;外来岩块主要为岛弧残片、复理石岩块(陆源碎屑沉积岩)等。以清水—苏吉泉断裂为界,该蛇绿混杂岩南北两侧分别构造侵位于扇三角洲相沉积的下石炭统姜巴斯陶组和弧前盆地沉积的中泥盆统蕴都喀拉组之中,另外在巴斯德阔彦一带见其被姜巴斯陶组不整合覆盖。

蛇绿混杂带南侧分布的中—上志留统白山包组、顶志留统一下泥盆统红柳沟组至泥盆系卡拉麦里组为一套连续的浅海相—斜坡相的陆缘碎屑沉积建造,总体上具被动陆源沉积组合特征;角度不整合覆盖在卡拉麦里组之上的下石炭统黑山头组由陆源碎屑岩、中酸性及中基性火山碎屑岩和火山岩组成,可能为碰撞期的岩浆活动产物。北侧出露的中—上志留统白山包组为半深海相浊积岩—复理石沉积组合,下泥盆统卓木巴斯套组为一套厚度较大的浅海—滨海相富含钙质的细碎屑岩,中泥盆统蕴都喀拉组为形成于弧前环境的富含火山碎屑的碎屑沉积岩系,下石炭统那林卡拉组为弧间斜坡底部

海底浊积扇沉积岩系,上述这些泥盆—石炭纪地层均被晚石炭世—早二叠世大面积的后碰撞期A型花岗岩基所侵入。

3 采样位置及岩石学特征

本次研究的斜长角闪岩位于卡拉麦里山巴斯德阔彦一带(图2a),呈透镜状或构造岩片夹持于蛇绿混杂带的蛇纹岩之中(图2b,图3a),野外可见斜长角闪岩中尚的矿物粒度和含量呈韵律性变化特征,总体表现为中下部为深灰色、灰黑色中—粗粒碎裂岩化斜长角闪岩(图3b),由灰黑色角闪石和灰白色斜长石形成条带,向上粒度逐渐变细且颜色变浅(图3c),角闪石含量逐渐减少,接近顶部存在少量的辉长岩残留体,总体具一定的堆晶序列特征,因此推测斜长角闪岩的原岩应为细粒辉长岩。岩石总体呈深灰色、灰黑色,柱粒状变晶结构,主要由角闪石(70%~80%)和斜长石(15%~20%)及一定量的绿帘石及少量的楣石等矿物组成(图3d),其中角闪石呈半自形柱状或粒状分布,粒径0.3~1 mm,其四

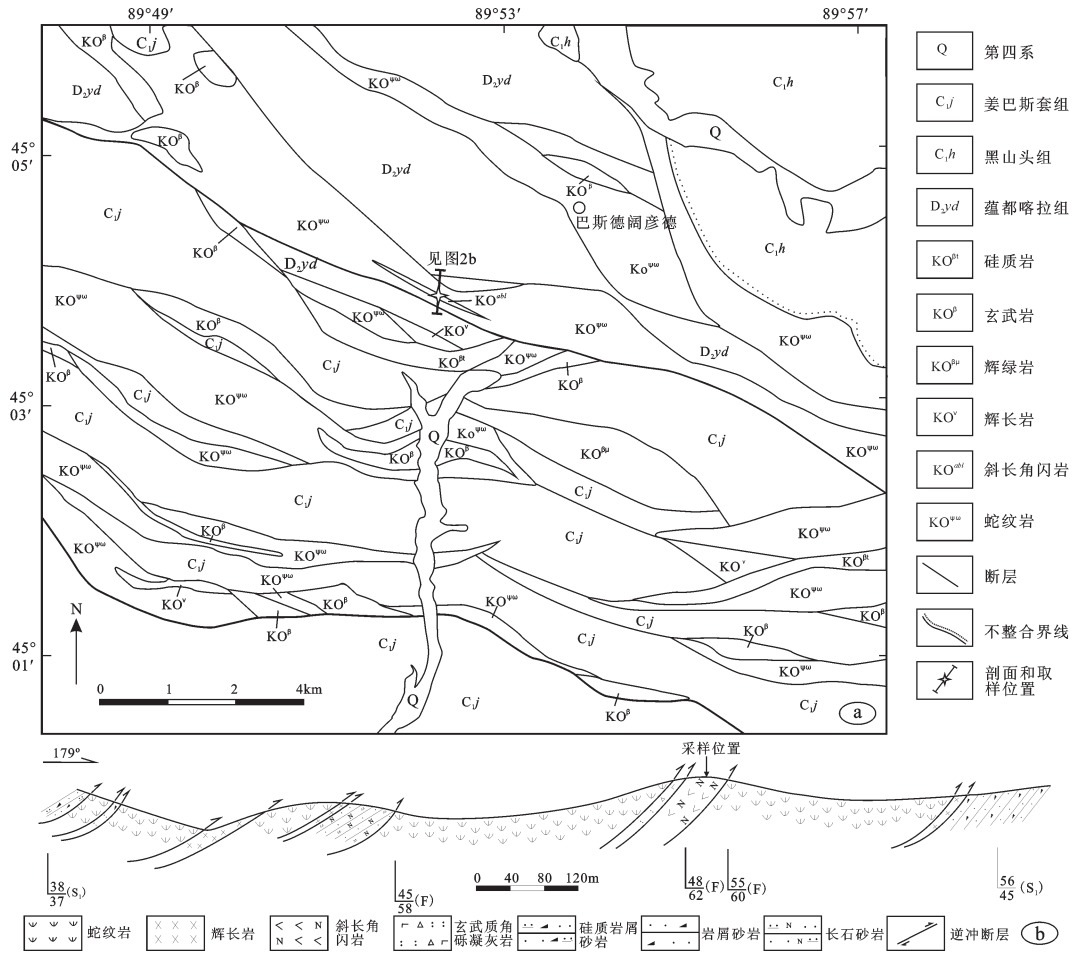


图2 卡拉麦里山巴斯德阔彦一带地质简图 (a) 和采样剖面图 (b)

Fig. 2 Simplified geological map of Basidekuoyan area (a) and geological cross section of sampling (b)

周表现出圆化或交代特征,常阳起石化,轻微具绿泥石化,少量磁铁矿和榍石常出现在角闪石边缘;斜长石多呈半自形柱状或短柱状,常具钠黝帘石化、葡萄石化、绢云母化蚀变特征。

4 分析方法

锆石单矿物分离是在廊坊区域地质调查研究院完成;锆石阴极发光(CL)显微照相在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的LEO1450VP扫描电子显微镜上完成。锆石U-Pb年代学和微量元素含量测试在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)测试完成。LA-ICP-MS激光剥蚀系统为美国NewWave公司生产的UP193FX型193 nm ArF 准分

子系统,激光器来自于德国ATL公司,ICP-MS为Agilent 7500 a。采用Plesovice(Sláma et al, 2008)和Qinghu(Li et al, 2009)标准锆石作为外标进行基体校正,成分标样采用NIST SRM 612,其中²⁹Si作为内标元素。在测试过程中每5个未知样品点插入一组标样(锆石标样和成分标样)。分析样品的同位素比值及元素含量计算均采用GLITTER(ver 4.0, Macquarie University)程序,普通铅校正采用Andersonv (2002)提出的ComPbCorr#3.17校正程序,U-Pb谐和图和年龄权重平均计算采用Isoplot (Ver 3.0)程序(Ludwig, 2003)完成。

岩石主、微量元素和Sr-Nd同位素分析均在核工业北京地质研究院分析测试中心完成,其中主量元素测试采用XRF法在PW2404X仪器上分析完成,分析精度优于1%。微量元素测试利用

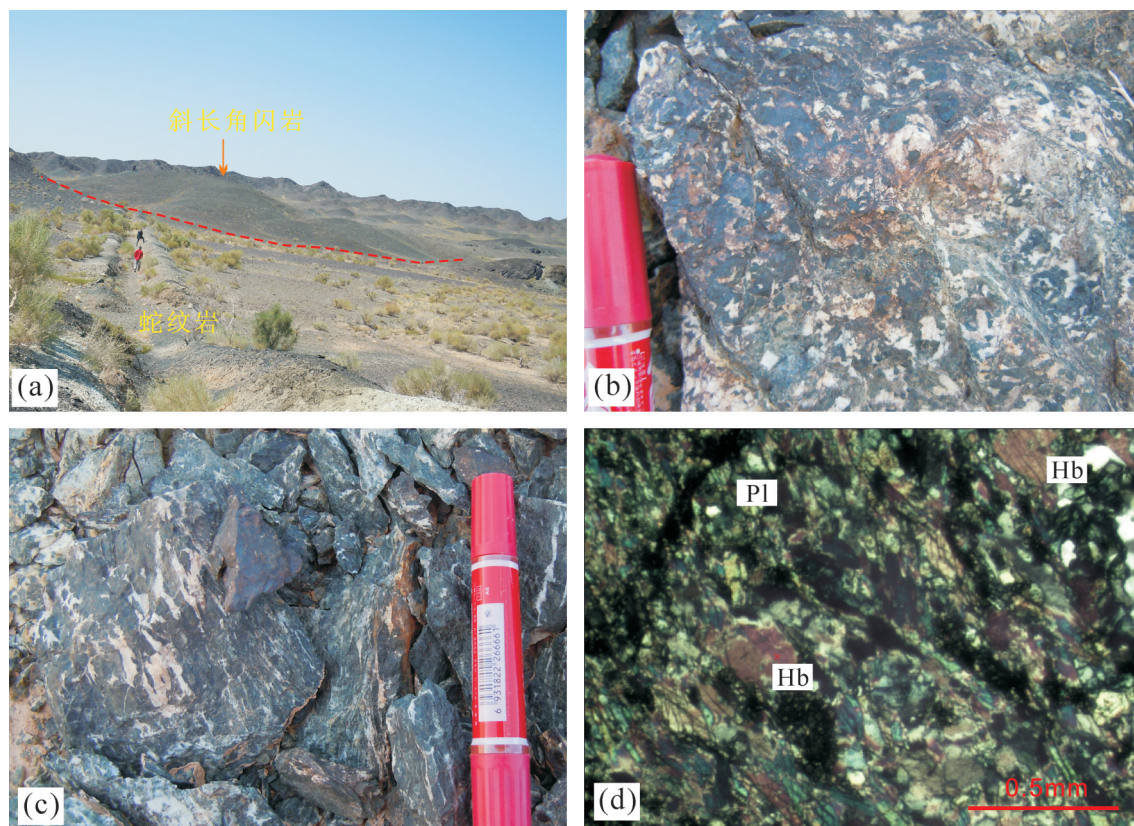


图3 斜长角闪岩野外露头(a、b、c)和显微照片(d)

Pl—斜长石;Hb—角闪石

Fig. 3 Specimen and microphotographs of the amphibolites

Pl—Plagioclase; Hb—Hornblende

ELEMENTII 高分辨电感耦合等离子体质谱分析仪分析完成,分析精度优于5%~10%。Sr-Nd同位素分析采用ISOPROBE-T热电质谱计(TIMs)进行分析,Sr和Nd同位素的分馏校正分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 。分析期间,Nd标样SHINESTU的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值的平均值为 $(0.512118\pm 3)(2\sigma)$,Sr标样NBS987标准 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定值的平均值为 $(0.710250\pm 7)(2\sigma)$ 。本次获得样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值是按照LA-ICP-MS锆石U-Pb定年得出的年龄进行校正的,亏损地幔Nd模式年龄(T_{DM})参考DePaolo(1981)中的模式进行计算。

5 结果分析

5.1 锆石U-Pb年龄

斜长角闪岩样品中的锆石在颜色上以淡玫瑰色为主,个别为白色,形态上以棱角状为主,锆石粒径介于70~130 μm 。阴极发光图像(图4)显示,锆石绝大部分具较好的晶形,呈现岩浆清晰的韵律环

带,内部无残留老核,外部无变质边,表明它们为岩浆成因的锆石。

利用LA-ICP-MS对其中14粒锆石完成了14个测点的U-Pb定年,分析结果见表1,显示锆石U、Th含量分别为 95×10^{-6} ~ 473×10^{-6} 和 45×10^{-6} ~ 360×10^{-6} ,Th/U比值为0.33~0.84,大部分大于0.4,与岩浆成因锆石特征相似。在锆石的U-Pb谐和曲线图中(图5a),14个分析点均位于U-Pb谐和线上且在一个很小的区域内, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化于395~411 Ma,其加权平均年龄为 (402.7 ± 4.9) Ma (MSWD=0.33)(图5b),代表斜长角闪岩原岩的结晶年龄,即早泥盆世。

5.2 岩石地球化学特征

卡拉麦里蛇绿岩中的13件斜长角闪岩岩石地球化学分析结果见表2。结果显示斜长角闪岩 SiO_2 含量在47.58%~50.57%,在 $\text{SiO}_2\text{-Zr/TiO}_2\times 0.0001$ (图6a)岩石分类图解中,样品均落入亚碱性玄武岩区域内,属于变基性岩类; TiO_2 含量相对较低,介于

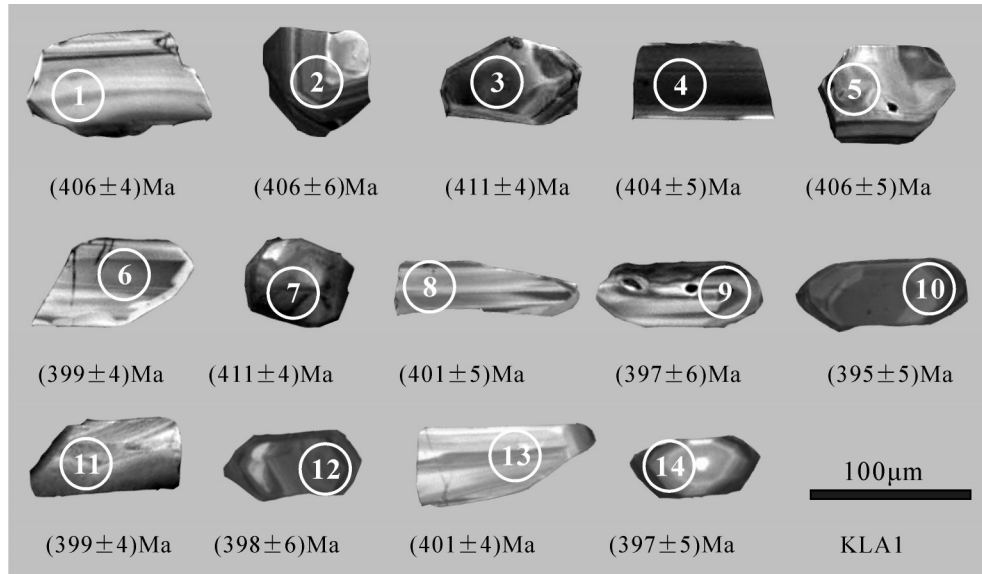


图4 斜长角闪岩锆石阴极发光图像及²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄

Fig.4 CL images of zircons from the amphibolites, and their ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages as measured by LA-ICP-MS

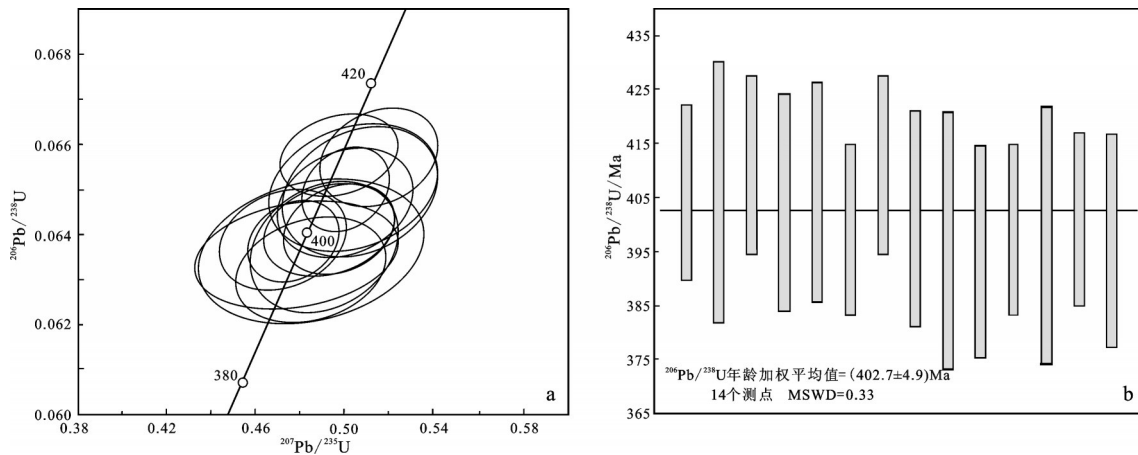


图5 斜长角闪岩锆石U-Pb谐和图(a)及²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄分布图(b)

Fig. 5 Concordia diagram showing zircon LA-ICPMS U-Pb dating results (a) and ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted mean age (b) of the amphibolites

0.93%~1.25%,平均值为1.16%;具较高的MgO含量(8.04%~9.12%,平均值为41.25%),其对应的Mg[#]变化于63.89~67.64,平均值为65.16;明显富钠贫钾(Na₂O/K₂O比值为17.94~27.41);Al₂O₃含量中等,为14.41%~15.67%,平均值为14.87%;CaO含量相对较高,为9.18%~11.56%,平均值为11.48;在AFM图解(图6b)上,样品均落入拉斑玄武岩系列区域。在MgO-CaO-FeO_T图解(图7a)和MnO-TiO₂图解(图7b)中,样品全部落在正斜长角闪石区域,表明斜长角闪岩的原岩应为正变质岩,这与岩石学判别的原

岩类型一致。

斜长角闪岩的稀土元素总量(ΣREE)较低且变化大不,ΣREE=37.93×10⁻⁶~48.38×10⁻⁶,平均值为41.09×10⁻⁶,与Sun and McDonough(1989)给出的N-MORB(39.11×10⁻⁶)可以对比。LREE/HREE=1.22~1.81,(La/Yb)_N=0.49~0.91,反映轻重稀土分馏较弱。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上(图8a),所有样品均表现为轻稀土元素(LREE)略亏损且Eu异常(δEu=0.83~1.22,平均值为0.99)不明显的特征,与N-MORB相似。

表1 斜长角闪岩(KLA01) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses of the amphibolites (KLA01) in the Kalamaili ophiolitic mélange

分析点号	元素含量(10^{-6})及比值				同位素比值				同位素年龄/Ma					
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
KLA01-01	89	154	0.38	0.5000	0.0127	0.0650	0.0006	0.0226	0.0004	443	40	412	9	406
KLA01-02	107	127	0.37	0.5048	0.0255	0.0651	0.0010	0.0197	0.0005	464	86	415	17	406
KLA01-03	350	542	0.74	0.5151	0.0174	0.0658	0.0007	0.0220	0.0004	485	56	422	12	411
KLA01-04	136	212	0.66	0.5007	0.0202	0.0646	0.0008	0.0233	0.0005	460	67	412	14	404
KLA01-05	95	165	0.60	0.5078	0.0226	0.0650	0.0008	0.0240	0.0006	478	76	417	15	406
KLA01-06	361	284	0.60	0.4788	0.0148	0.0639	0.0006	0.0228	0.0003	388	52	397	10	399
KLA01-07	172	473	0.65	0.4978	0.0171	0.0658	0.0006	0.0200	0.0006	409	60	410	12	411
KLA01-08	109	227	0.63	0.4916	0.0183	0.0641	0.0008	0.0166	0.0005	438	62	406	12	401
KLA01-09	75	166	1.23	0.4770	0.0283	0.0635	0.0010	0.0221	0.0009	390	106	396	19	397
KLA01-10	68	205	0.99	0.4856	0.0219	0.0632	0.0008	0.0222	0.0008	441	78	402	15	395
KLA01-11	135	204	0.27	0.4710	0.0177	0.0639	0.0007	0.0222	0.0005	350	65	392	12	399
KLA01-12	350	346	0.37	0.4964	0.0256	0.0637	0.0010	0.0220	0.0005	473	87	409	17	398
KLA01-13	39	267	0.13	0.4980	0.0168	0.0641	0.0007	0.0185	0.0011	467	57	410	11	401
KLA01-14	45	95	0.44	0.4793	0.0298	0.0635	0.0008	0.0238	0.0009	401	117	398	20	397

为了避免变质作用对岩石的影响,在对其原始地幔标准化及形成的构造环境讨论时,主要采用不活动的高场强元素和稀土元素。在原始地幔标准化微量元素蜘蛛图解(图 8b)中,所有样品均具有与 N-MORB 相似的配分模式特征,无明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 及 Ti 的亏损,明显不同于岛弧环境、俯冲环境或大陆地壳所形成的火山岩(Pearce and Peate, 1995),另外样品中 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素丰度则与 N-MORB 十分一致,暗示样品可能来自于亏损的软流圈地幔源区。

5.3 全岩 Sr-Nd 同位素

样品的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值为 0.70412~0.70433, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 值为 0.51258~0.51260, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 8.7~9.2, Nd 同位素二阶段模式年龄为 398~443 Ma, 接近锆石的结晶年龄(402 Ma), 这些特征指示了斜长角闪岩原岩岩浆可能来自亏损地幔源区。

6 讨论

6.1 源区特征

斜长角闪岩呈构造岩片产于卡拉麦里蛇绿岩混杂带中,岩相学和地球化学特征均指示其原岩可能为辉长岩。岩石具有较低的 SiO_2 (47.58%~50.57%) 含量,高 $\text{Mg}^\#$ 值(63.89~67.64) 与原生玄武质岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值(63~73, Frey et al., 1978) 相近,具有高的 Ni 和 Cr 含量(分别为 68.9×10^{-6} ~ 99.2×10^{-6} 和 306×10^{-6} ~ 398×10^{-6}), 显示出幔源岩浆的特点。稀土及微量元素配分曲线具有与 N-MORB 类似的特征(图 8)。样品($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值较低,介于 0.70412~0.70433, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较高,介于 8.7~9.2, 与该蛇绿混杂岩中的镁铁质岩石($\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 7.2~9.8) (刘希军等, 2007) 和斜长花岗岩($\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 9.2) (唐红峰等, 2007) 均相似, 这些特征表明了卡拉麦里蛇绿岩所代表的古洋壳的地幔源区有 MORB 强烈亏损地幔的参与。微量元素比值可以有效区分原始岩浆演化过程受流体或地壳混染的程度,其地球化学特征指示源区性质,在 La/Yb-Nb/Yb 和 Zr/Yb-Nb/Yb 关系图解(图 9) 中,斜长角闪岩样品投点主要落入地幔序列,靠近 N-MORB 区域,进一步说明斜长角闪岩原岩的岩浆源区来源于亏损地幔。

表2 斜长角闪岩主量元素(%)、微量元素(10^{-6})及Sr-Nd同位素分析结果Table 2 Major elements (%), trace elements (10^{-6}) and Sr-Nd isotopic compositions of the amphibolites in the Kalamaili ophiolitic mélange

样号	KLA01	KLA02	KLA03	KLA04	KLA05	KLA06	KLA07	KLA08	KLA09	KLA10	KLA11	KLA12	KLA13
SiO ₂	48.78	49.27	48.89	48.45	48.78	50.46	48.67	47.58	48.82	50.57	48.84	49.03	49.83
TiO ₂	1.24	1.16	1.23	1.06	1.25	0.931	1.27	1.16	1.23	1.11	1.23	1.18	1.08
Al ₂ O ₃	15.04	14.95	15.00	15.36	15.03	14.41	14.97	15.67	15.07	14.52	15.08	15.09	15.00
Fe ₂ O ₃	3.13	2.04	2.98	1.72	3.06	1.69	3.08	2.24	2.95	1.97	3.27	2.03	1.56
FeO	7.20	7.57	7.15	7.68	7.30	8.01	7.20	7.18	7.40	7.37	6.90	7.47	7.55
MnO	0.18	0.18	0.17	0.14	0.15	0.188	0.17	0.16	0.16	0.18	0.15	0.16	0.17
MgO	8.43	8.43	8.50	9.12	8.42	8.68	8.47	8.70	8.51	8.04	8.42	8.08	8.40
CaO	10.90	10.48	10.90	10.40	10.94	9.18	10.99	11.56	10.93	10.48	10.89	11.24	10.62
Na ₂ O	3.14	3.20	3.16	2.87	3.14	3.95	3.08	2.61	3.12	3.41	3.18	3.09	3.32
K ₂ O	0.13	0.17	0.12	0.16	0.12	0.166	0.12	0.08	0.12	0.15	0.12	0.11	0.12
P ₂ O ₅	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.105	0.10	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09
LOI	1.74	2.44	1.78	2.93	1.65	2.21	1.80	2.95	1.56	2.10	1.80	2.42	2.27
Total	100.01	99.98	99.98	99.98	99.94	99.98	99.92	99.97	99.96	99.99	99.97	99.99	100.01
Mg [#]	64.00	65.46	64.62	67.64	63.89	65.83	64.22	66.67	64.14	65.03	64.37	64.76	66.49
La	2.53	2.05	2.21	2.54	2.40	3.74	2.31	2.14	2.61	2.23	2.33	2.42	2.65
Ce	8.23	6.72	7.20	7.89	7.97	10.8	7.07	7.26	8.64	7.32	6.73	7.55	8.16
Pr	1.38	1.32	1.45	1.36	1.35	1.67	1.45	1.34	1.69	1.34	1.29	1.43	1.41
Nd	8.48	7.71	8.27	7.70	8.07	8.5	8.00	7.35	9.51	7.54	7.80	7.68	7.62
Sm	2.99	2.81	2.69	2.84	2.61	2.57	2.74	2.85	2.91	2.79	2.92	3.01	2.97
Eu	1.18	1.00	1.13	0.92	1.10	1.06	1.15	1.13	1.45	0.95	0.93	1.05	0.89
Gd	3.99	3.63	3.68	3.68	4.14	3.49	3.98	3.85	4.54	3.64	4.07	3.89	3.45
Tb	0.87	0.57	0.81	0.60	0.89	0.645	0.77	0.55	0.96	0.57	0.78	0.59	0.53
Dy	5.48	4.37	4.87	4.38	5.60	4.28	5.29	4.76	5.80	4.39	4.80	4.61	4.07
Ho	1.21	1.03	0.98	0.99	1.06	0.871	1.03	1.13	1.30	1.02	0.99	1.07	1.01
Er	3.38	3.04	3.39	2.81	3.39	2.65	3.30	2.90	3.94	2.82	3.21	2.87	2.61
Tm	0.54	0.47	0.55	0.44	0.53	0.379	0.49	0.45	0.63	0.40	0.49	0.50	0.43
Yb	3.52	2.82	2.75	2.80	3.08	2.95	3.27	2.84	3.82	2.90	3.01	2.87	2.55
Lu	0.54	0.39	0.49	0.38	0.59	0.415	0.50	0.43	0.57	0.36	0.40	0.40	0.33
ΣREE	44.32	37.93	40.47	39.33	42.78	44.02	41.35	38.98	48.38	38.27	39.75	39.94	38.68
LREE/HREE	1.27	1.32	1.31	1.45	1.22	1.81	1.22	1.31	1.24	1.38	1.24	1.38	1.58
δEu	1.04	0.96	1.10	0.87	1.02	1.08	1.06	1.04	1.22	0.91	0.83	0.94	0.85
(La/Yb) _N	0.52	0.52	0.58	0.65	0.56	0.91	0.51	0.54	0.49	0.55	0.56	0.60	0.75
Y	32.1	26.9	29.6	26.0	30.6	24.2	28.7	27.7	33.7	26.1	27.6	27.5	25.1
Li	2.94	3.51	2.88	5.62	2.88	13.6	3.08	4.84	3.78	2.40	2.66	2.91	2.90
Cu	69.1	106.0	56.4	18.5	67.3	182.0	57.7	23.4	68.7	79.0	51.2	62.0	87.5
Pb	1.04	0.53	0.39	0.65	0.78	0.817	0.70	0.42	1.52	0.97	1.27	0.75	0.51
Zn	56.5	63.1	50.0	32.3	53.5	114.0	47.2	35.9	61.6	56.8	42.7	37.6	38.5
Ga	18.5	15.4	15.7	15.2	18.2	15	16.7	17.1	19.6	14.3	15.3	15.7	14.7
Cs	0.02	0.04	0.01	0.06	0.02	0.29	0.03	0.06	0.03	0.04	0.02	0.04	0.07
Sc	52.5	36.3	48.3	33.4	51.5	49.4	49.4	30.9	54.8	33.9	44.5	34.3	33.0
Cr	386	358	353	368	359	30.6	352	368	395	355	342	351	349
Co	64.5	39.2	56.4	46.2	65.7	63.3	60.4	44.7	64.2	39.7	60.9	40.9	41.0
Ni	89.4	75.9	81.4	99.2	84.0	29.1	81.5	83.0	93.2	68.9	76.3	79.3	81.0
V	335	273	313	259	332	439	312	275	357	262	293	274	265
Rb	0.83	1.33	0.77	2.62	0.84	2.83	0.81	1.11	0.89	2.32	0.69	1.38	1.61
Sr	176	128	167	150	168	263	169	226	199	119	154	142	137
Ba	12.5	22.8	11.1	25.2	11.6	80.4	12.0	10.9	14.6	29.3	10.6	22.6	22.9
Ta	0.14	0.19	0.11	0.18	0.11	0.092	0.10	0.27	0.14	0.17	0.09	0.18	0.21
Nb	1.22	0.73	1.10	0.80	1.29	0.90	1.19	0.94	1.33	0.89	0.99	0.77	0.90
Th	0.09	0.08	0.08	0.22	0.07	0.28	0.09	0.30	0.10	0.06	0.07	0.02	0.06
U	0.99	0.04	0.52	0.26	0.73	0.18	0.54	0.46	0.70	0.29	0.55	0.13	0.10
Zr	60.30	70.10	62.30	61.20	61.50	96.20	69.82	68.80	68.40	64.20	67.60	68.80	61.20
Hf	1.68	1.59	1.42	1.27	1.50	2.55	1.50	1.48	1.39	1.38	1.34	1.46	1.31
Rb/ 10^{-6}	0.83	0.77	0.77	0.84	0.81	1.69	0.81	0.89	0.89	0.69	1.54	1.37	1.31
Sr/ 10^{-6}	176	167	167	168	168	263	169	226	199	119	154	142	137
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.01401		0.01382		0.01482		0.01420		0.01329		0.01338		0.01338
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.70441		0.70427		0.70437		0.70428		0.70434		0.70419		0.70419
±2σ	0.000012		0.000012		0.000014		0.000012		0.000009		0.000015		0.000015
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.70433		0.70419		0.70428		0.70420		0.70426		0.70412		0.70412
Sm/ 10^{-6}	2.99		2.69		2.91		2.74		2.91		2.92		2.92
Nd/ 10^{-6}	7.48		7.27		7.67		7.25		7.91		7.80		7.80
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.24169		0.22372		0.22940		0.22851		0.22244		0.22635		0.22635
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.51320		0.51315		0.51318		0.51319		0.51318		0.51317		0.51317
±2σ	0.000011		0.000009		0.000012		0.000014		0.000006		0.000011		0.000011
(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	0.51257		0.51256		0.51257		0.51259		0.51259		0.51257		0.51257
ε _{Nd(t)}	8.7		8.7		8.9		9.2		9.2		8.8		8.8
T _{2DM} /Ma	437		443		425		398		401		428		428
f _{Sm/Nd}	0.23		0.14		0.17		0.16		0.13		0.15		0.15

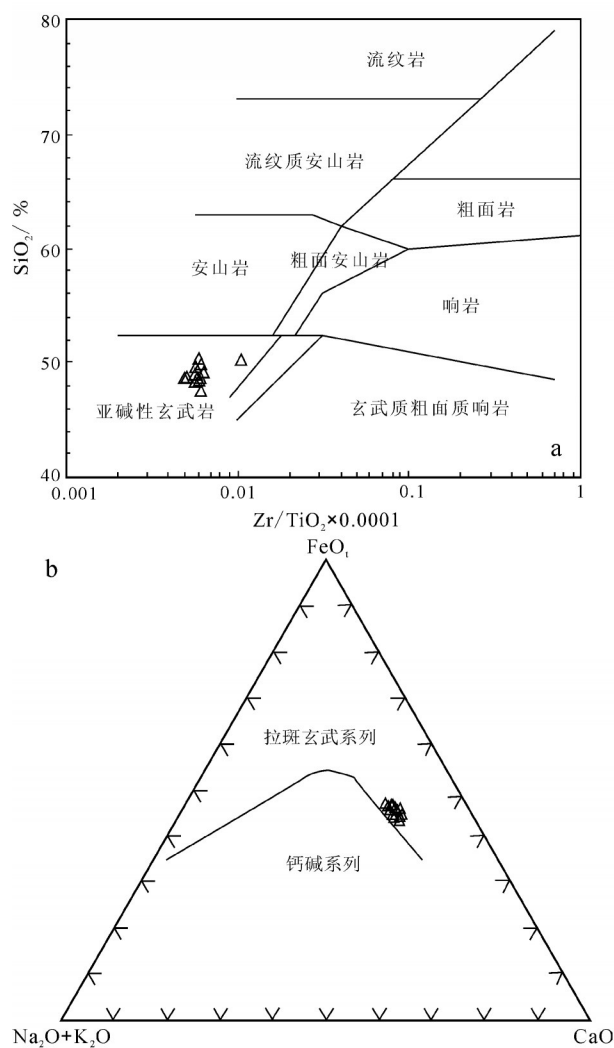


图6 斜长角闪岩 $Zr/TiO_2 \times 0.0001$ - SiO_2 岩石分类图解 (a, 据 Winchester and Floyd, 1977) 和 AFM 图解 (b, 据 Irvine and Baragar, 1971)

Fig. 6 SiO_2 - $Zr/TiO_2 \times 0.0001$ (a, after Winchester and Floyd, 1977) and MnO - TiO_2 (b, after Irvine and Baragar, 1971) diagrams of the amphibolites

6.2 构造环境

斜长角闪岩的微量元素和稀土元素特征显示与 N-MORB 具有明显的相似性, 而与 WPB 和 OIB 的差别比较明显, Ce/Zr 值为 0.10~0.14, 平均值为 0.12; Th/Yb 值为 0.01~0.11, 平均值为 0.04, 明显区别于 OIB 的对应值 (分别为 0.3、1.9), 而与大洋中脊 MORB 相似 (分别为 0.16、0.14)。 La/Nb 值为 1.86~4.16, 平均值为 2.55; Nb/Y 值为 0.26~0.42, 平均值为 0.33, 与 OIB 完全不同 (分别为 0.8、1.25), 而与 E-

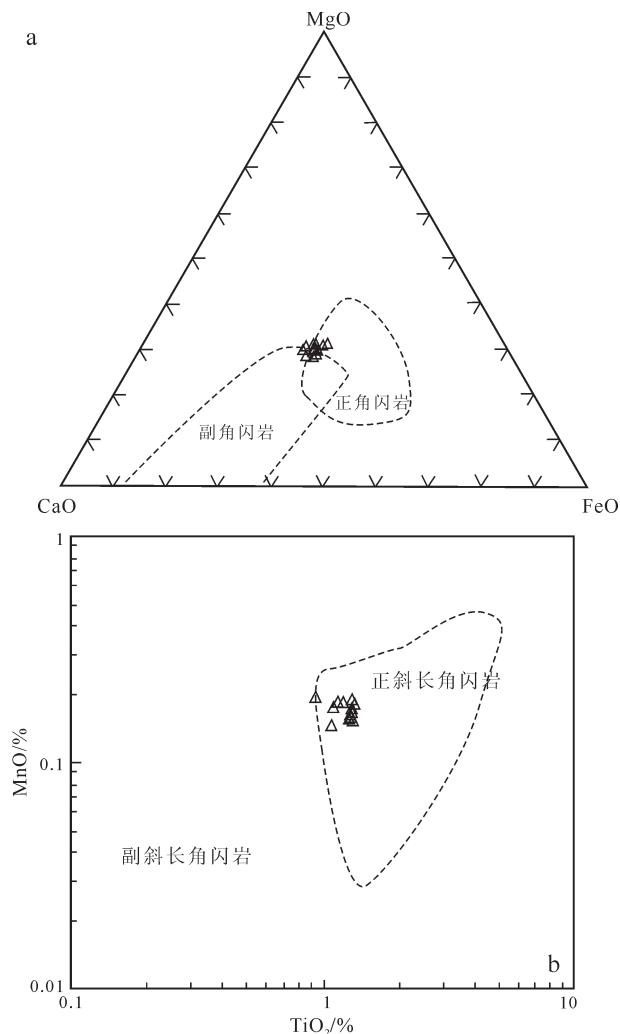


图7 斜长角闪岩 MgO - CaO - FeO 图解 (a) (据 Masra, 1971) 和 MnO - TiO_2 图解 (b) (据赵振华, 1997)

Fig. 7 MgO - CaO - FeO (a) (after Masra, 1971) and MnO - TiO_2 (b) diagram of amphibolites (after Zhao, 1997)

MORB 的也相差较大 (分别为 0.76、0.29, 更为接近 N-MORB (分别为 1.07、0.09)。在 TiO_2 - FeO / MgO 图解 (图 10a) 中, 样品落入洋中脊玄武岩 (MORB) 范围内; 在 $Th-Ta-Hf/3$ 图解 (图 10b) 中, 样品均落入 N-MORB 区域内。由此可见, 卡拉麦里蛇绿岩中斜长角闪岩可能形成于洋中脊构造环境。因此, 本文推测, 巴斯德阔彦德地区斜长角闪岩的原岩可能为古洋壳残片, 应属于卡拉麦里蛇绿混杂带的组成部分。

6.3 地质意义

近年来, 关于卡拉麦里蛇绿岩的形成时代获得了一批高精度的测年数据, 如笔者曾获得巴斯德阔

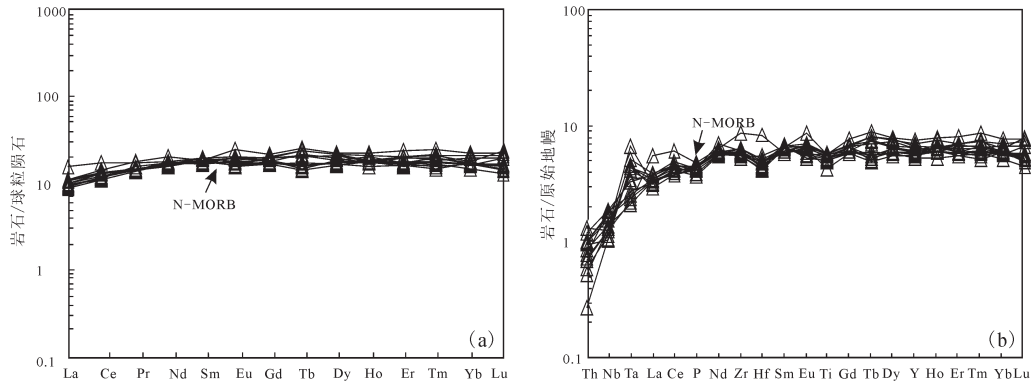


图8 斜长角闪岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)
(球粒陨石和原始地幔标准化值均来源于Sun and McDonough, 1989)

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams of trace elements (b) of the amphibolites in the Kalamaili ophiolitic mélangé (chondrite-normalized REE and primitive mantle-normalized data after Sun and McDonough, 1989)

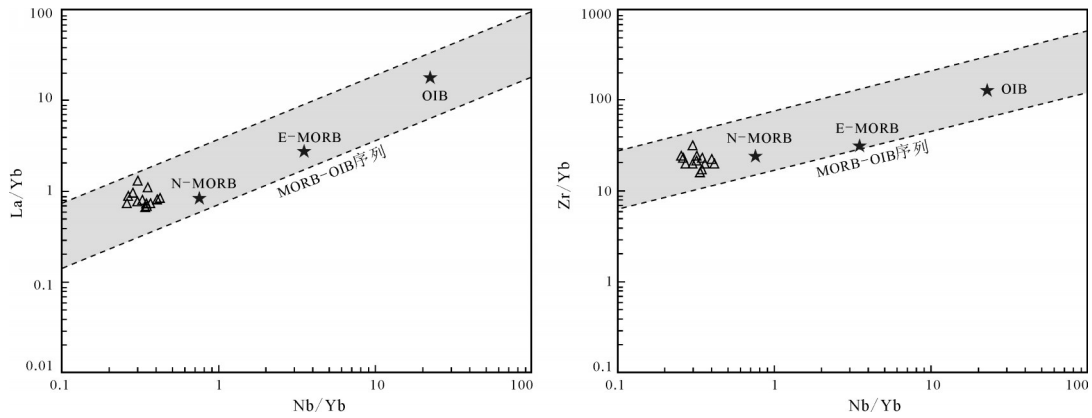


图9 斜长角闪岩源区判别图解(据 Shervais, 1982)

Fig.9 Magma discrimination plots for the amphibolites (after Shervais, 1982)

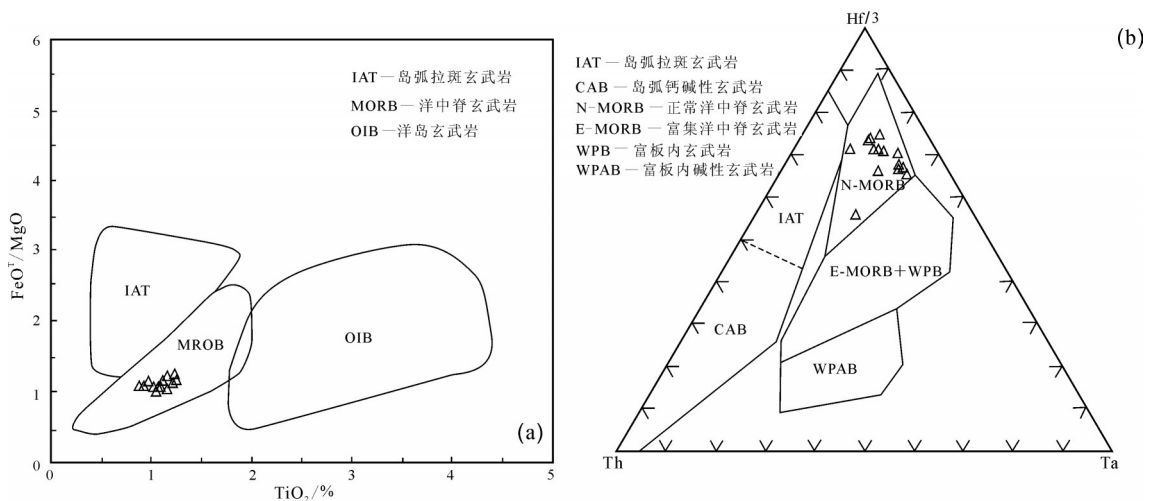


图10 斜长角闪岩构造环境判别图解

a—FeO/MgO—TiO₂图解(据 Pearce and Cann, 1973); b—Th—Ta—Hf/3 图解(据 Wood, 1980)

Fig.10 Discrimination diagram of tectonic environment of the amphibolites

a—FeO/MgO—TiO₂ diagram (after Pearce and Cann, 1973); b—Th—Ta—Hf/3 diagram (after Wood, 1980)

彦地区该蛇绿岩中辉绿岩锆石U-Pb年龄为(416.7±3.2) Ma (黄岗等, 2012)和枕状玄武岩锆石U-Pb年龄为(418.5±5.4) Ma (另文发表), 胡朝斌等(2014)获得滴水泉地区辉长岩的锆石U-Pb年龄为(416.8±3.2) Ma, 方爱明等(2015)获得红柳沟地区辉长岩锆石U-Pb年龄为(406.8±1.8) Ma, 这些年龄信息指示了该洋盆在早泥盆世已形成。本次获得卡拉麦里蛇绿混杂带中形成于洋中脊构造环境的斜长角闪岩锆石U-Pb年龄为(402.7±4.9) Ma, 表明斜长角闪岩的原岩形成时代为早泥盆世, 进一步表明卡拉麦里古洋盆开启时限至少可追溯至早泥盆世。硅质岩发现有晚泥盆世法门期一早石炭世杜内期的放射虫化石(舒良树和王玉净, 2003), 暗示了该洋盆可能为有限洋盆。

通常, 以俯冲折返拼贴式就位的蛇绿岩的俯冲深度较大, 常发生高压变质作用, 然后经构造折返回到地表, 经历了俯冲增压和折返减压两个阶段, 蛇绿岩片因此具有较高的变质程度, 镁铁质岩常变质为斜长角闪岩, 超镁铁质岩变质为蛇纹岩, 复理石基质以角闪岩变质为主, 局部可达麻粒岩-榴辉岩相, 在折返减压过程中常发生退变质作用(朱云海等, 2000)。李锦轶(1990)将卡拉麦里蛇绿岩划分为两种侵位方式: 一种是洋盆闭合陆块碰撞导致蛇绿岩块体构造侵位于中泥盆世弧前沉积物, 产出于板块缝合带附近; 另一种是与弧前沉积物一起构成混杂堆积, 并提出卡拉麦里蛇绿岩侵位过程的三个构造阶段, 即经历了俯冲、碰撞仰冲和陆内逆冲推覆。梁云海(1999)提出卡拉麦里蛇绿岩是沿消减带(SSZ)上方的断裂系统于弧前构造侵位, 多出现于洋盆汇聚早期阶段, 早于岛弧的形成, 属特提斯型蛇绿岩。本次在卡拉麦里蛇绿混杂带中新发现的具N-MORB特征的斜长角闪岩, 代表了被肢解的古洋壳残片, 揭示了卡拉麦里古洋壳至少在402 Ma后发生了向北的深俯冲, 部分镁铁质岩(辉长岩)发生了角闪岩相变质, 然后经构造折返至地表, 其就位方式可能为俯冲折返拼贴式, 而且这种就位方式在东准噶尔乃至中亚地区古生代增生造山过程中扮有着重要的角色。

7 结 论

基于对新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩混杂岩

中斜长角闪岩的岩石学、岩石地球化学、Sr-Nd同位素及年代学的研究, 可以得出以下认识:

(1) 在新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿混杂带中新发现的斜长角闪岩原岩可能为辉长岩, LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为(402.7±4.9) Ma, 表明其形成时代为早泥盆世。

(2) 岩石地球化学及Sr-Nd同位素分析显示, 斜长角闪岩具低SiO₂及高MgO、Ni和Cr和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的特征, 与洋中脊拉斑玄武岩一致; 稀土元素配分曲线呈弱亏损型至平坦型, 同时微量元素蛛网图与N-MORB的类似, 其原始岩浆来源于亏损地幔。

(3) 综合分析斜长角闪岩地球化学特征并结合区域地质构造背景, 认为其原岩形成于洋中脊的构造环境, 代表了被肢解的古洋盆岩石圈残片, 进一步佐证了卡拉麦里蛇绿岩所代表的古洋盆的开启时限至少可追溯至早泥盆世。

致谢: 在野外地质调查过程中得到了西安地质调查中心陈隽璐研究员的悉心指导; 陕西区域地质矿产研究院李海平教授级高工审阅了原稿, 并提出了宝贵的修改意见; 锆石LA-ICP-MS U-Pb定年测试和解释得到了中国科学院青藏高原研究所岳雅慧副研究员的热情帮助; 匿名审稿专家和责任编辑对论文提出了建设性意见和建议, 在此一并表示衷心感谢!

注释

① 陕西区域地质矿产研究院. 2013. 新疆1:25万滴水泉(L45C003004)、北塔山牧场(L46C003001)幅区域地质调查报告[R].

References

- Andersen T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59-79.
- Chen B, Jahn B M. 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 691-703.
- DePaolo D J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 53: 189-202.
- Fang Aimin, Wang Shigang, Zhang Junmin, Zang Mei, Fang Jiahu, Hu Jianming. 2015. The U-Pb ages of zircons from the gabbro in the Klamaili ophiolite, North Xinjiang and its tectonic significances [J]. *Chinese Journal of Geology*, 50(1): 140-154 (in Chinese with

- English abstract).
- Frey F A, Green D H, Roy S D. 1978. Integrated models of basalt petrogenesis: A study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data [J]. *Journal of Petrology*, 19: 463–513.
- He Gguoqi, Li Maosong, Jia Jindou, Zhou Hui. 2001. A discussion on age and tectonic significance of ophiolite in Eastern Junggar, Xinjiang [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(5): 819–824 (in Chinese with English abstract).
- Hu Chaobin, Liao Qunan, Fan Guangming, Chen Shuai, Wu Weiwei, Tian Jian, Wang Fuming. 2014. Discovery of MOR-type ophiolites from the Dishuiquan region, eastern Junggar [J]. *Chinese Science Bulletin*, 59: 2213–2222 (in Chinese with English abstract).
- Huang Gang, Niu Giuzhi, Wang Xinlu, Guo Jun, Yu Feng. 2012. Formation and emplacement age of Karamaili ophiolite: LA-ICP-MS zircon U-Pb age evidence from the diabase and tuff in eastern Junggar, Xinjiang [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1267–1278 (in Chinese with English abstract).
- Irvine T N, Baragar W A R. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523–548.
- Jiří Sláma, Jan Košler, Daniel J Condon, James L Crowley, Axel Gerdes, John M Hanchar, Matthew S A Horstwood, George A Morris, Lutz Nasdala, Nicholas Norberg, Urs Schaltegger, Blair Schoene, Michael N Tubrett, Martin J Whitehouse. 2008. Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 249, 1–35
- Li Jinyi, Yang Tiannan, Li Yaping, Zhu Zhixin. 2009. Geological features of the Karamaili faulting belt, Eastern Junggar region, Xinjiang, China and its constraints on the reconstruction of Late Paleozoic ocean-continental framework of the Central Asian Region [J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1817–1826 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Zhu Baoqing, Fen Yimin. 1989. Confirmation of the unconformity relationships between the Namingshui Formation and ophiolites and their significance [J]. *Regional Geology of China*, 3: 250–255 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 1995. Main characteristics and Emplacement processes of the East Junggar ophiolites, Xinjiang, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(supp.): 73–84 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yunhai, Li Wenqian, Li Weidong, Li Yaping. 1999. Ophiolite emplacement mechanism of Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 17(4): 344–349 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Liu Y, Li Q L, Guo C H and Chamberlain K R.. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization, *Geochem [J]. Geophys. Geosyst*, 10, Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400.
- Li Xijun, Xu Jifeng, Hou Qingye, Bai Zhenghua, Lei Min. 2007. Geochemical characteristics of Karamaili ophiolite in east Junggar, Xinjiang: Products of ridge subduction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1591–1602 (in Chinese with English abstract).
- Long X P, Yuan C, Sun M. 2012. Geochemistry and U-Pb detrital zircon dating of Paleozoic graywackes in East Junggar, NW China: Insights into subduction-accretion processes in the southern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 21: 637–653.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for isoplot 3.00 [J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 46.
- Masra S N. 1971. Chemical distinction of high-grade ortho- and parametabasite [J]. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 51: 311–316.
- Pearce J A, Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 19: 290–300.
- Pearce J A, Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251–285
- Sengör A M C, Natal'in B. 1996. Turkic-type orogeny and its role in the making of the continental crust [J]. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 24: 263–337.
- Shervais J W. 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 31: 457–484
- Shu Liangshu, Wang Yujing. 2003. Late Devonian-Early Carboniferous radiolarian fossils from siliceous rocks of the Karamaili ophiolite, Xinjiang [J]. *Geological Review*, 49 (4): 408–412 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins* [J]. *Geological Society London Special Publications*, 42: 313–345.
- Tang Hongfeng, Su Yuping, Liu Congqiang, Hou Guangshun, Wang Yanbin. 2007. Zircon U-Pb age of the plagiogranite in Karamaili belt, northern Xinjiang and its tectonic implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 110–117 (in Chinese with English abstract).
- Tian Jian, Liao Qunan, Fan Guangming, Nie Xiaomei, Wang Fuming. 2015. The discovery and tectonic implication of Early Carboniferous post-collisional I-type granites from the south of Karamaili in eastern Junggar [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1471–1484 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bangyao, Jiang Changyi, Li Yongjun, Wu Hongen, Xia Zhaode, Lu Ronghui. 2009. Karamaili East Junggar ophiolites geochemical characteristics and tectonic significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(3): 74–82 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fuming, Liao Qunan, Fan Guangming, Chen Wenjuan, Tian Jian, Chen Shuai, Wu Weiwei, Hu Chaobin. 2014. Geological implications of unconformity between Upper and Middle

- Devonian, and 346.8 Ma post-collision volcanic rocks in Karamaili, Xinjiang [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(9): 1243–1257 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yong, Chen Wanfeng, Sha Xin, Zhai Xinwei, Wang Jinrong. 2014. The petrological characteristics and tectonic implications of Jiangbasitao Formation in Eastern Junggar, Xinjiang [J]. *Gansu Geology*, 23(4): 41–45 (in Chinese with English abstract).
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 20: 325–343.
- Wood D A. 1980. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 50: 11–30.
- Wu Runjiang, Zhang Yuanyuan, Tan Jiayi, Guo Zhaojie. 2009. The characteristics of different structure layers and tectonic implications since Late Paleozoic in Kalamaili area, Xinjiang [J]. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 102–109 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Qin K Z, Sun S, Li J L. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia[J]. *American Journal of Science*, 304: 370–395.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, Sun M, Lin S F, Chen H L, Li Z L, Li J L, Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 102–117.
- Xu X W, Jiang N, Li X H, Wu C, Qu X, Zhou G, Dong L H. 2015. Spatial-temporal framework for the closure of the Junggar Ocean in central Asia: New SIMS zircon U–Pb ages of the ophiolitic mélange and collisional igneous rocks in the Zhifang area, East Junggar [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 470–491.
- Xu Xueyi, Li Rongshe, Chen Juanlu, Ma Zhongping, Li Zhipai, Wang Hongliang, Bai Jianke, Tang Zhuo. 2014. New constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1521–1534 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 1997. *Geochemical Theory of Trace Element* [M]. Beijing: Science Press, 65–67 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yunhai, Pan Yuanming, Zhang Kexin, Wang Guocan, Chen Nengsong, Hou Guangjiu. 2000. Emplacement mechanisms of ophiolites and their characteristics [J]. *Geological Science and Technology Information*, 19(1): 16–18 (in Chinese with English abstract).
- 麦里蛇绿岩中辉长岩的锆石 U–Pb 年龄及其构造意义[J]. *地质科学*, 50(1): 140–154.
- 何国琦, 李茂松, 贾进斗, 周辉. 2001. 论新疆东准噶尔蛇绿岩的时代及其意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 37(6): 852–858.
- 胡朝斌, 廖群安, 樊光明, 陈帅, 吴魏伟, 田健, 王富明. 2014. 东准噶尔滴水泉地区发现洋中脊型蛇绿岩[J]. *科学通报*, 22: 2213–2224.
- 黄岗, 牛广智, 王新录, 郭俊, 宇峰. 2012. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的形成和侵位时限—来自辉绿岩和凝灰岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄的证据[J]. *地质通报*, 31(8): 1267–1278.
- 李锦轶, 杨天南, 李亚萍, 朱志新. 2009. 东准噶尔卡拉麦里断裂带的地质特征及其对中亚地区晚古生代洋陆格局重建的约束 [J]. *地质通报*, 28(12): 1817–1826.
- 李锦轶, 朱宝清, 冯益民. 1989. 南明水组和蛇绿岩之间不整合关系的确认及其意义[J]. *中国区域地质*, 3: 250–255.
- 李锦轶. 1995. 新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史[J]. *岩石学报*, 11(增刊): 73–84.
- 梁云海, 李文铅, 李卫东, 李亚萍. 1999. 新疆蛇绿岩就位机制[J]. *新疆地质*, 17(4): 344–349.
- 刘希军, 许继峰, 侯青叶, 白正华, 雷敏. 2007. 新疆东准噶尔克拉麦里蛇绿岩地球化学: 洋脊俯冲的产物[J]. *岩石学报*, 23(7): 1591–1602.
- 舒良树, 王玉净. 2003. 新疆卡拉麦里蛇绿岩带中硅质岩的放射虫化石[J]. *地质论评*, 49(4): 408–412.
- 唐红峰, 苏玉平, 刘丛强, 侯广顺, 王彦斌. 2007. 新疆北部卡拉麦里斜长花岗岩的锆石 U–Pb 年龄及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(1): 110–117.
- 田健, 廖群安, 樊光明, 聂小妹, 王富明. 2015. 东准噶尔卡拉麦里断裂以南早石炭世后碰撞花岗岩的发现及其地质意义[J]. *岩石学报*, 31(5): 1471–1484.
- 汪帮耀, 姜常义, 李永军, 吴宏恩, 夏昭德, 卢荣辉. 2009. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的地球化学特征及大地构造意义[J]. *矿物岩石*, 29(3): 74–82.
- 王富明, 廖群安, 樊光明, 程雯娟, 田健, 陈帅, 吴魏伟, 胡朝斌. 2014. 新疆卡拉麦里上–中泥盆统间角度不整合和 346.8Ma 后碰撞火山岩的意义[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 39(9): 1243–1257.
- 王勇, 陈万峰, 沙鑫, 翟新伟, 王金荣. 2014. 新疆东准噶尔地区姜巴斯套组岩石学特征及构造意义[J]. *甘肃地质*, 23(4): 41–45.
- 吴润江, 张元元, 谭佳奕, 郭召杰. 2009. 新疆卡拉麦里地区晚古生代以来不同构造层特征及大地构造意义[J]. *地学前缘*, 16(3): 102–109.
- 徐学义, 李荣社, 陈隽璐, 马中平, 李智佩, 王洪亮, 白建科, 唐卓. 2014. 新疆北部古生代构造演化的几点认识[J]. *岩石学报*, 30(6): 1521–1534.
- 赵振华. 1997. *微量元素地球化学原理*[M]. 北京: 科学出版社, 65–67.
- 朱云海, 潘元明, 张克信, 王国灿, 陈能松, 侯光久. 2000. 蛇绿岩就位机制研究[J]. *地质科技情报*, 19(1): 16–18.

附中文参考文献

方爱民, 王世刚, 张俊敏, 藏梅, 方家虎, 胡健明. 2015. 新疆北部卡拉