

doi:10.3799/dqkx.2015.096

# 东昆仑南缘布青山构造混杂带得力斯坦南 MOR 型玄武岩地质、地球化学特征及岩石成因

李瑞保<sup>1,2</sup>, 裴先治<sup>1,2\*</sup>, 李佐臣<sup>1,2</sup>, 陈有忻<sup>2</sup>, 刘成军<sup>2</sup>,  
裴磊<sup>3</sup>, 徐通<sup>2</sup>, 刘战庆<sup>4</sup>, 魏博<sup>2</sup>

1. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西西安 710054

2. 长安大学国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西西安 710054

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

4. 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541004

**摘要:** 东昆仑南缘布青山构造混杂带发育有较多 OIB 型玄武岩, 这类玄武岩成因与地幔柱密切相关, 与灰岩密切伴生的具有 MOR 型特征的基性火山岩亦是东昆仑南缘古特提斯洋盆一类重要的海山玄武岩。为了查明布青山构造混杂带中不同类型洋岛或海山玄武岩的岩石成因, 对得力斯坦南玄武岩进行了详细的地质、地球化学和岩石成因研究。布青山地区得力斯坦南出露的玄武岩岩石类型复杂多样, 主要由枕状玄武岩、气孔—杏仁状玄武岩、角砾状玄武岩和块状玄武岩组成。主量元素地球化学特征表明, 该套玄武岩属于深海拉斑玄武岩和洋脊拉斑玄武岩系列。得力斯坦南玄武岩  $\Sigma$  REE 介于  $34.51 \times 10^{-6} \sim 61.60 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 介于 0.89~1.37,  $(La/Yb)_N$  介于 0.30~0.56,  $\delta Eu$  介于 0.90~1.18。球粒陨石标准化稀土元素配分图呈现轻稀土元素亏损的左倾型, 与 NMORB 型玄武岩稀土元素配分曲线基本相同。得力斯坦南玄武岩 Zr、Hf、Nb 和 Ta 含量均相当于 NMORB 的相应元素的丰度值。Zr/Nb 值介于 24.59~57.69, Nb/La 值介于 0.45~0.94, Hf/Ta 值介于 18.29~31.94。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 曲线右侧高场强元素基本未分异 (Nb、Ta、Zr、Hf 等), 并贴近于 NMORB 标准线, 具有与 NMORB 玄武岩相似而明显不同于 EMORB 和 OIB 型玄武岩的特征。微量元素判别表明其形成于洋中脊或由于洋脊扩张向两侧后移的洋中脊构造环境, 结合其上覆盖有深水硅泥岩及浅水厚层状碳酸盐岩的地质事实, 认为其在地形地貌上属于古海山。岩石成因研究表明该套玄武岩起源于亏损地幔 (DM), 并估算其为地幔二辉橄榄岩发生约 10% 部分熔融的产物。

**关键词:** 东昆仑; 玄武岩; 布青山; 古特提斯洋; 地球化学; 岩石学。

中图分类号: P588

文章编号: 1000-2383(2015)07-1148-15

收稿日期: 2014-12-05

## Geological and Geochemical Features of Delisitannan Basalts and Their Petrogenesis in Buqingshan Tectonic Mélange Belt, Southern Margin of East Kunlun Orogen

Li Ruibao<sup>1,2</sup>, Pei Xianzhi<sup>1,2\*</sup>, Li Zuochen<sup>1,2</sup>, Chen Youxin<sup>2</sup>, Liu Chengjun<sup>2</sup>,  
Pei Lei<sup>3</sup>, Xu Tong<sup>2</sup>, Liu Zhanqing<sup>4</sup>, Wei Bo<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3. College of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

4. School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos. 41172186, 41472191, 40972136); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (Nos. CHD2011TD020, 2013G1271091, 2013G1271092); 青海省国土资源厅——中国铝业公司公益性区域地质矿产调查基金项目 (No. 200801)。

**作者简介:** 李瑞保 (1982—), 男, 讲师, 博士, 主要从事区域构造研究。E-mail: Lirubao0971@163.com

\* 通讯作者: 裴先治, E-mail: peixzh@sina.com

**引用格式:** 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等, 2015. 东昆仑南缘布青山构造混杂带得力斯坦南 MOR 型玄武岩地质、地球化学特征及岩石成因. 地球科学——中国地质大学学报, 40(7): 1148—1162.

**Abstract:** OIB-type basalts outcropped in the Buqingshan tectonic mélange belt, southern margin of East Kunlun, are closely related to mantle plume petrogenetically. The MOR-type basalts are also another types of seamount basalts developed in the Paleotethys ocean. The Delisitanan basalts in Buqingshan area are located in the southern margin of the East Kunlun region. Field investigations show that the basalts are composed of pillow basalts, fumarolic-amygdaloidal basalts, breccia basalts and massive basalts, which are covered by lamellar fuchsia silicon mudstone. Geochemical data show that the basalts are subdivided into abyssal tholeiite and oceanic ridge tholeiite series. The contents of REE range from  $34.51 \times 10^{-6}$ – $61.60 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE = 0.89–1.37,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.30$ –0.56. The chondrite-normalized REE pattern shows left-dipped incline and weak negative Eu abnormality ( $\delta\text{Eu} = 0.90$ –1.18), which is identical to NMORB REE distribution pattern. The Delisitanan basalts are aschistic in HSFE (Nb, Ta, Zr, Hf), and Zr/Nb ratios range from 24.59–57.69, Nb/La ratios range from 0.45–0.94, Hf/Ta ratio ranges from 18.29–31.94, which are all similar to those of NMORB basalts, and are obviously different from EMORB and OIB basalts. All of the trace element characteristics indicate that the basalts formed in an NMORB tectonic environment. The petrogenesis study shows that the rocks originated from depleted mantle, and are the product of 10% partial melting of mantle lherzolite roughly.

**Key words:** East Kunlun; basalt; Buqingshan; paleotethyan ocean; geochemistry; petrology.

布青山构造混杂带是近年来新厘定出的一条构造混杂带,以其出露2个不同洋陆构造演化的物质建造为特色。前人已从地质、地球化学和同位素年代学角度对不同类型构造混杂岩块的构造属性、形成时代进行了研究,并取得了较多研究成果(边千韬等,1999;Bian *et al.*, 2001, 2004; 刘战庆等, 2011a, 2011b, 2011c; 胡楠等, 2013; 李佐臣等, 2013; 李瑞保等, 2014; 裴先治等, 2015)。其中,得力斯坦寒武纪MOR型蛇绿岩块、亿可哈拉尔志留纪岛弧型岩块、白日切特志留纪岛弧型中酸性火山岩的厘定,表明布青山地区曾经发育过与原特提斯洋相关的早古生代洋陆旋回,并把之前认为的东昆中早古生代洋盆物质记录(Yang *et al.*, 1996; 王国灿等, 1999; 朱云海等, 1999; 刘彬等, 2013a, 2013b; Li *et al.*, 2013a, 2013b; Meng *et al.*, 2013; 姜高磊等, 2014)向南移至布青山以及阿尼玛卿一带(Li *et al.*, 2007)。近年来前人通过对布青山—阿尼玛卿地区地质填图与研究,在其中又发现和确证了晚古生代洋盆的物质记录,如石炭纪哈尔郭勒MOR型蛇绿岩(刘战庆等, 2011a, 2011b, 2011c)、德尔尼蛇绿岩(Chen *et al.*, 2004; 杨经绥等, 2004; Yang *et al.*, 2009)、石炭纪玛积洋岛玄武岩(Guo *et al.*, 2007)、石炭纪哥日卓托洋岛玄武岩(李瑞保等, 2014)、石炭纪哈尔郭勒洋岛玄武岩(杨杰等, 2014)等。布青山—阿尼玛卿、勉略及三江地区洋岛玄武岩和蛇绿岩系共同表明了晚古生代位于冈瓦纳大陆与欧亚大陆之间东古特提斯洋北缘分支洋盆的发育(王秉璋等, 2000; Zhang *et al.*, 2000, 2004; 裴先治, 2001; 赖绍聪等, 2002; Stampfli and Borel, 2002; Bian *et al.*, 2004; 杨经绥等, 2004; 张智勇等, 2004; 李才等, 2007; 赖绍聪和秦江峰, 2010; Dong *et al.*, 2011; Metcalfe, 2013; 许志

琴等, 2013),布青山—阿尼玛卿古特提斯洋自晚二叠世向东昆仑地块之下的俯冲消减导致在东昆仑地区产生了大面积近东西向分布的安第斯型弧岩浆岩及弧前盆地沉积系统(闫臻等, 2008, 2012; Xiong *et al.*, 2012; 李碧乐等, 2012; 李瑞保, 2012; 李瑞保等, 2012; 马昌前等, 2013)。

有关布青山构造混杂带中晚古生代洋岛或海山玄武岩岩石成因的研究表明哥日卓托洋岛玄武岩与地幔柱成因密切相关,并且为尖晶石二辉橄榄岩发生1%~3%部分熔融的产物(李瑞保等, 2014)。Guo *et al.*(2007)在研究阿尼玛卿构造带玛积洋岛玄武岩和德尔尼玄武岩后认为,玛积雪山可能代表了古地幔柱沿洋中脊形成的洋脊热点构造,类似于现今北大西洋冰岛构造。杨杰等(2014)认为哈尔郭勒洋岛玄武岩具有MORB和OIB双重地球化学属性,很可能为地幔柱热点叠加于洋中脊而相互作用的产物,并且地幔类型为EM II型。由此看来,布青山—阿尼玛卿一带晚古生代古洋盆中确实发育有不同岩石组合及地球化学特征的洋岛或海山组合,存在着多样的岩石源区与熔融机制。最近,在布青山构造混杂带得力斯坦沟脑,还发现一套岩石类型较为复杂的基性火山岩,野外调查表明该套基性火山岩没有与蛇纹岩、辉长岩及辉绿岩共生,而是在其上覆盖有一层较薄的深水硅泥岩及浅水碳酸盐岩,初步研究表明其具有NMORB地球化学属性。因此,对得力斯坦南玄武岩地质、地球化学特征及岩石成因的详细研究不仅有助于丰富东古特提斯北缘分支洋盆内部洋岛或海山岩石类型,而且有助于深入理解古大洋盆地内部的板内构造岩浆作用类型及成因。

# 1 区域地质背景

布青山构造混杂带位于东昆仑造山带南缘, 呈近东西向展布, 南北宽约 10 km, 东西长约 35 km, 向东延伸与阿尼玛卿构造带相接(图 1). 近年来学者

从物质组成角度将布青山构造混杂带划分为基质与不同时代、不同构造属性的混杂岩块两大系统(刘战庆等, 2011a, 2011b, 2011c). 其中, 基质为中下二叠统马尔争组( $P_{1-2}m$ ), 主要为一套大陆斜坡深海一半深海环境的重力流沉积, 砂岩地球化学特征指示马

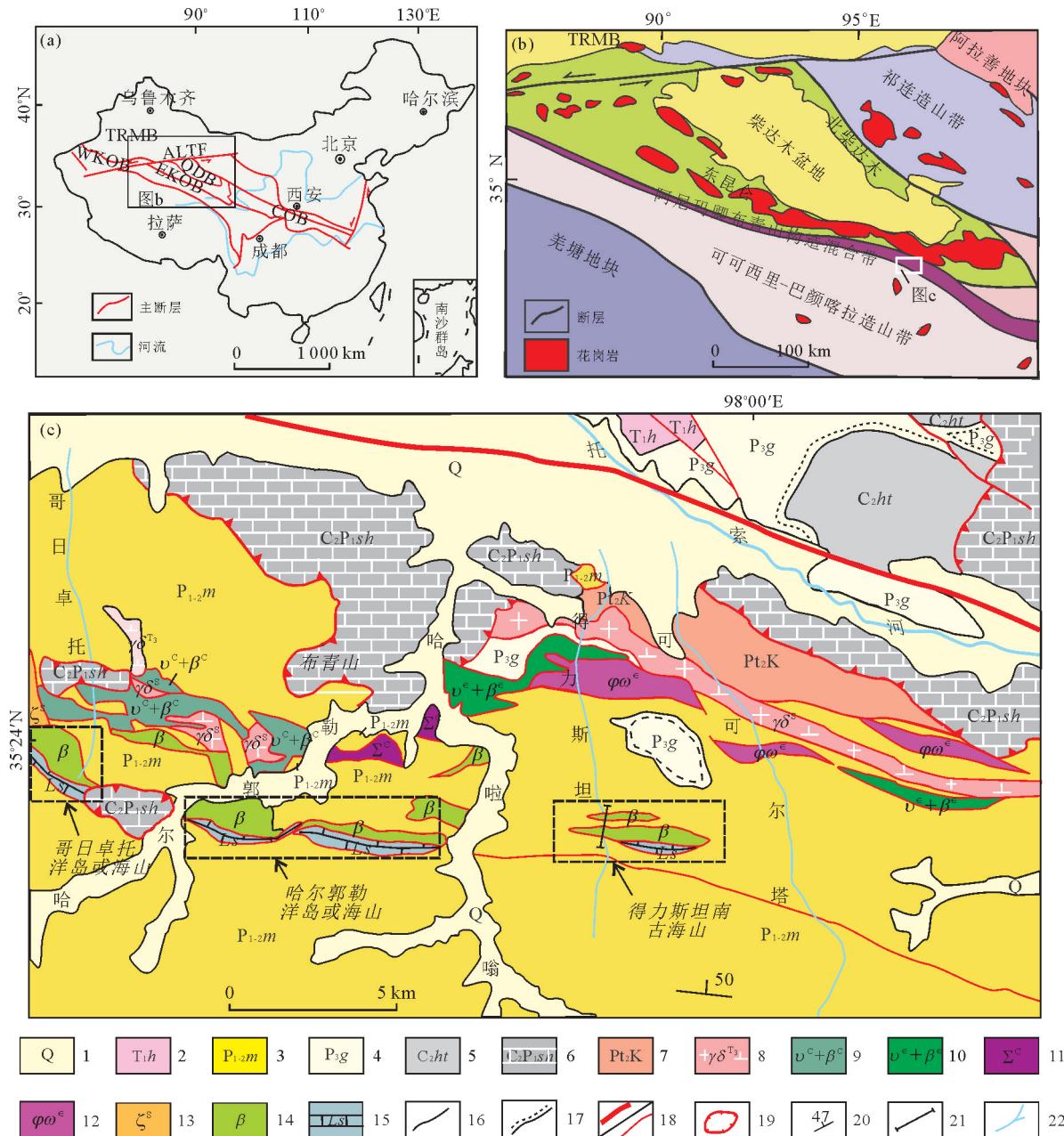


图 1 中央造山系构造格架 (a) 和东昆仑—祁连地区地质构造 (b) 以及布青山构造混杂带地质简图 (c)

Fig.1 The tectonic framework of central orogenic belt (a), the tectonic background of Qilian-East Kunlun area (b) and the simplified geological map of Buqingshan tectonic mélange belt (c)

COB. 中央造山系; EKOB. 东昆仑造山带; WKOB. 西昆仑造山带; QDB. 柴达木盆地; TRMB. 塔里木盆地; ALTF. 阿尔金左行走滑断层. 1. 第四系; 2. 下三叠统洪水川组; 3. 中下二叠统马尔争组; 4. 上二叠统格曲组; 5. 上石炭统浩特洛洼组; 6. 上石炭统一下二叠统树维门科组; 7. 中元古界苦海岩群; 8. 晚三叠世花岗闪长岩; 9. 石炭纪玄武岩与辉长岩; 10. 寒武纪玄武岩与辉长岩; 11. 石炭纪蛇纹岩; 12. 寒武纪橄榄岩; 13. 流纹斑岩; 14. 洋岛或海山玄武岩; 15. 厚层块状碳酸盐岩; 16. 地质界线; 17. 角度不整合界线; 18. 主干断层或一般断层; 19. 逆冲推覆构造; 20. 地层产状(°); 21. 实测剖面位置; 22. 水系

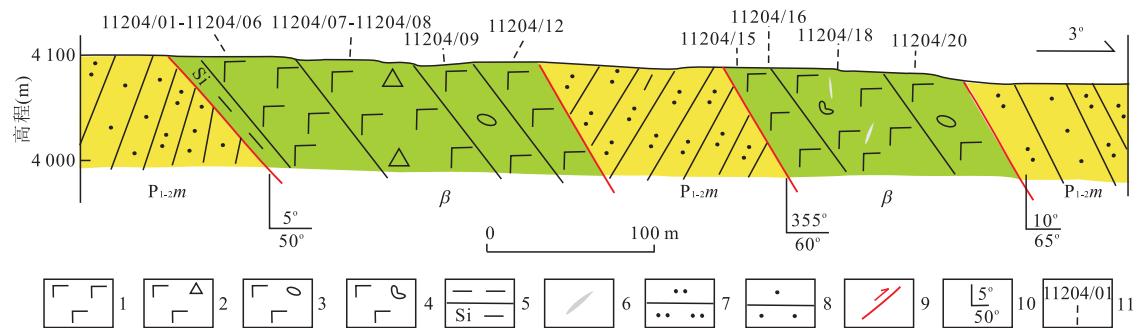


图2 得力斯坦南玄武岩地质剖面

Fig.2 The geological section of basalts from the Delisitannan area

1.块状玄武岩;2.角砾状玄武岩;3.气孔状玄武岩;4.枕状玄武岩;5.硅泥岩;6.网状碳酸盐脉;7.粉砂岩;8.砂岩;9.断层;10.产状;11.样品编号及采样位置

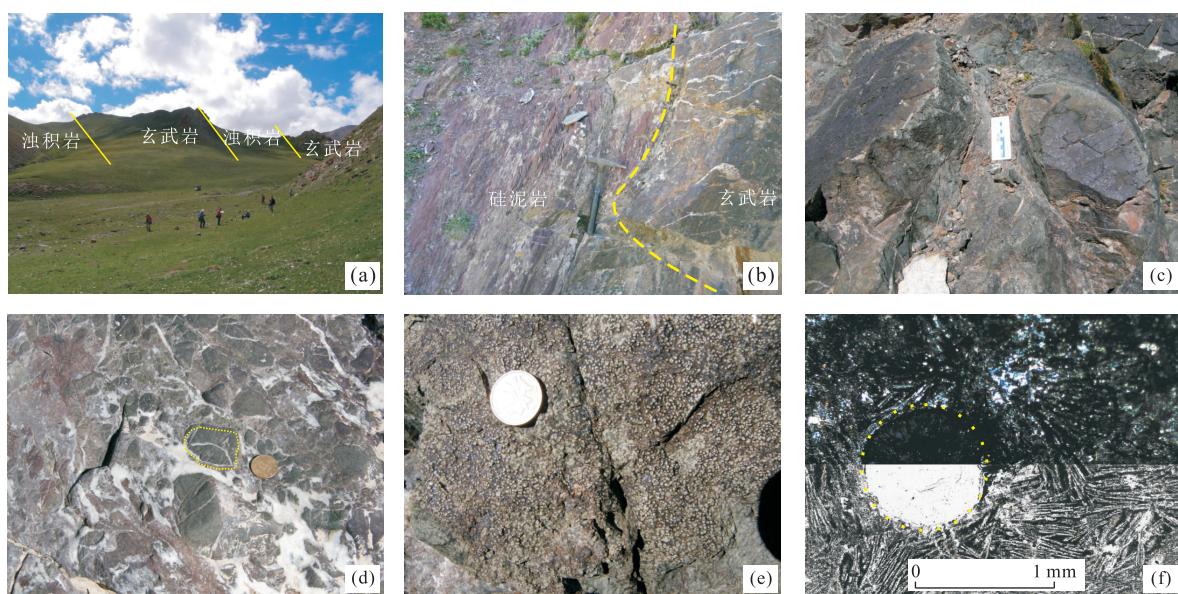


图3 得力斯坦南玄武岩产出状态及岩石学特征

Fig.3 Photos of the Delisitannan basalts showing the field contact relationship and petrological features

a.玄武岩与围岩马尔争组呈断层接触关系;b.玄武岩与紫红色硅泥岩整合接触;c.枕状玄武岩,单个岩枕大小约30~50 cm;d.角砾状玄武岩及网状碳酸盐脉;e.豆粒状玄武岩;f.杏仁状玄武岩,上为正交偏光,下为单偏光

尔争组形成于大陆边缘构造环境(胡楠等,2013;裴先治等,2015).混杂岩块主要包括中元古界苦海岩群( $Pt_2K$ )、寒武纪洋壳型岩块(寒武纪得力斯坦蛇绿岩)、志留纪岛弧型岩块(弧英安岩、弧花岗闪长岩)、石炭纪洋壳型岩块、石炭纪洋岛型或海山型岩块等.得力斯坦玄武岩分布于布青山构造混杂带南侧,位于得力斯坦沟脑一带,主体呈东西向产出,与围岩中下二叠统马尔争组呈断层接触关系(图2,图3a).该套玄武岩在岩石组合与产出特征方面,均区别于北侧的蛇绿岩系中的玄武岩(图1c).该套玄武岩没有与蛇纹岩、辉长岩、辉绿岩等镁铁-超镁铁质岩石共生产出,而是与深水相硅泥岩相伴产出,在该

玄武岩东侧还与厚层块状碳酸盐岩相伴生,明显具有洋岛或海山的“基座+盖层”的二元组合特征(图4).从野外地质特征来看,该套玄武岩与硅泥岩地层均北倾,紫红色硅泥岩及碳酸盐岩位于玄武岩南侧,与正常海山结构恰恰相反,反映出一个地层倒转的海山结构,与区域西侧出露的哈尔郭勒、哥日卓托洋岛或海山玄武岩/灰岩的产状一致,均为北倾的倒转层序.从玄武岩岩石类型来看,布青山构造混杂带南侧玄武岩类型较多,颜色多为浅灰绿色、肝红色,多呈隐晶质结构,发育枕状构造、块状构造、气孔-杏仁状构造、角砾状构造等.其中枕状玄武岩几乎均呈浅灰绿色-灰绿色,外壳具冷凝边,单个岩枕直径多

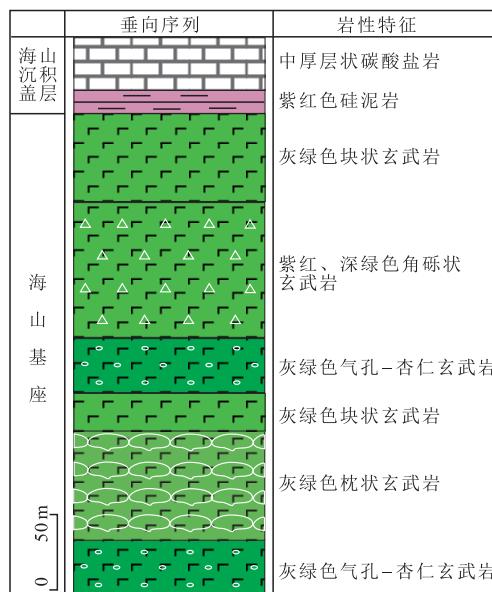


图 4 得力斯坦南古海山综合地层柱状图

Fig. 4 Comprehensive stratum column for Delisitannan sea mountain

为 30~50 cm. 枕状玄武岩表面还发育有大量粒径为 0.2~0.5 cm 的球粒. 角砾状构造的玄武岩既有灰绿色的, 也有紫红色的, 且角砾状玄武岩中玄武岩角砾多被白色碳酸盐和基性熔岩胶结. 块状构造玄武岩和气孔—杏仁状构造玄武岩呈浅灰色—灰绿色—深灰绿色.

## 2 岩石学特征

**枕状玄武岩:** 多呈灰—灰绿色, 具有间隐—间粒结构, 枕状构造. 主要矿物成分为斜长石(约 75%)、暗色矿物(约 25%)及少量磁铁矿. 斜长石粒径为 1.0~1.6 mm, 呈针柱状杂乱分布, 集合体常呈放射状分布. 在其所形成的间隙中分布有发生次生蚀变的绿泥石和少量磁铁矿等. 岩石蚀变强烈, 斜长石多钠黝帘石化, 少量蚀变为高岭土、绢云母. 原岩中的镁铁质暗色矿物未见任何残留, 全被绿泥石集合体、次闪石等矿物所取代.

**角砾状玄武岩:** 多呈灰绿色或紫红色, 在角砾状玄武岩中节理发育, 多被方解石细脉和少量石英细脉充填. 角砾状玄武岩主要由玄武质角砾和白色碳酸盐及基性熔岩胶结. 角砾大小一般介于 1~10 cm, 大者达 40 cm, 呈棱角状, 成分为玄武岩, 镜下观察玄武质角砾呈间隐结构, 主要矿物成分为斜长石(约 70%)和暗色矿物(约 30%)及极少量磁铁矿. 白色碳

酸盐胶结物呈微晶结构, 矿物成分单一, 主要为方解石, 粒径大小介于 0.02~0.03 mm.

**豆粒状玄武岩:** 多呈灰—灰绿色, 因玄武岩表面发育粒径为 0.2~0.5 cm 的球粒而较为特殊. 镜下观察玄武岩呈间隐—间粒结构, 块状构造, 主要组成矿物为斜长石(约 70%)和暗色矿物(约 30%)及少量磁铁矿, 其中斜长石呈针柱状杂乱分布, 在其间隙中充填有次闪石和磁铁矿等颗粒. 暗色矿物部分已经蚀变为次闪石和绿泥石.

**杏仁状玄武岩:** 多呈灰绿色, 呈斑状结构, 基质具粗玄结构, 气孔—杏仁状构造. 主要矿物为斜长石(约 65%)、绿泥石和次闪石(35%), 少量磁铁矿、绢云母、黝帘石等. 由于岩石强烈蚀变, 原岩矿物及结构残留较少. 岩石中杏仁体均呈浑圆状, 杏仁体成分以碳酸盐为主, 含量约 1%, 大小一般为 0.4~0.5 mm. 局部可见斜长石呈长柱状杂乱分布, 其间隙中分布有绿泥石、次闪石等矿物, 构成典型的粗玄结构.

## 3 测试方法

用于岩石地球化学研究的玄武岩样品采自得力斯坦沟西侧(图 1c, 图 2), 样品采集过程中避开脉体发育地段. 样品分别进行主量元素和微量元素分析测试. 样品磨碎至 200 目后, 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进行主量和微量元素分析测试. 主量元素使用 X 射线荧光光谱仪(XRF-1500)法测试, 精度优于 2%~3%. 微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品, 使用 ICP-MS(Element II)测试, 分析精度优于 10%. 化学分析测试流程参考文献介绍的方法(Chen *et al.*, 2000, 2002). 分析测试结果见表 1.

## 4 地球化学特征

### 4.1 主量元素

由表 1 可以看出, 得力斯坦玄武岩  $\text{SiO}_2$  含量介于 40.54%~49.50%, 总体属于基性岩石范畴.  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量变化较大, 分别介于 0.42%~6.16% 和 0.03%~2.49%,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  含量介于 0.80~6.95, 反映岩石后期发生了强烈的蚀变作用.  $\text{TiO}_2$  含量介于 1.13%~1.41%, 平均值为 1.27%, 与大洋拉斑玄武岩平均值(1.44%)接近, 而明显不同于岛弧拉斑玄武岩  $\text{TiO}_2$  值(0.84%)和洋岛玄武

表1 得力斯坦南玄武岩主量元素(%)、稀土元素和微量元素( $10^{-6}$ )测试结果Table 1 Results of major elements(%), trace elements and rare earth elements ( $10^{-6}$ ) from the Delisitannan basalts

样品号	11204/01	11204/02	11204/03	11204/04	11204/05	11204/06	11204/07
SiO <sub>2</sub>	47.28	46.71	48.01	48.08	49.50	46.44	40.54
TiO <sub>2</sub>	1.21	1.21	1.29	1.17	1.36	1.41	1.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.19	13.02	14.66	14.22	14.48	15.37	13.88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.00	3.46	3.32	3.07	1.51	6.46	7.24
FeO	6.08	7.65	8.08	7.50	9.22	3.99	3.13
MnO	0.17	0.18	0.19	0.20	0.22	0.17	0.37
MgO	6.77	11.06	9.60	9.43	10.35	8.68	2.16
CaO	9.85	6.30	7.50	8.92	5.40	7.35	13.87
Na <sub>2</sub> O	4.52	2.21	3.73	3.25	4.34	2.47	6.00
K <sub>2</sub> O	0.42	0.03	0.13	0.31	0.05	2.49	0.24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	0.12
Mg# <sup>#</sup>	66	72	68	69	67	79	55
La	2.91	2.85	2.30	2.10	2.52	3.22	2.52
Ce	8.79	8.47	7.43	6.69	7.7	9.9	7.15
Pr	1.61	1.53	1.32	1.19	1.44	1.72	1.45
Nd	9.31	9.20	8.17	7.18	8.55	10.00	9.00
Sm	3.30	3.21	3.00	2.84	3.30	3.66	3.49
Eu	1.260	1.090	1.040	0.913	1.230	1.370	1.320
Gd	4.04	4.08	3.78	3.40	4.20	4.51	4.34
Tb	0.924	0.896	0.879	0.808	0.972	1.000	0.980
Dy	5.96	5.76	5.42	5.07	6.05	6.49	6.60
Ho	1.33	1.28	1.18	1.14	1.35	1.43	1.38
Er	3.88	3.65	3.61	3.39	4.01	4.22	4.23
Tm	0.622	0.582	0.574	0.537	0.664	0.681	0.644
Yb	3.91	3.74	3.66	3.55	4.23	4.45	4.20
Lu	0.598	0.520	0.557	0.549	0.635	0.664	0.599
$\delta$ Eu	1.05	0.92	0.94	0.90	1.01	1.03	1.04
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.50	0.51	0.42	0.40	0.40	0.49	0.40
$\Sigma$ LREE	28.31	27.58	24.74	22.21	26.42	31.16	26.75
$\Sigma$ HREE	18.28	17.35	16.82	15.94	18.92	19.97	19.67
LREE/HREE	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.15	0.15
Sc	34.1	36.4	37.9	37.9	38.5	41.7	33.2
V	295	279	303	286	318	341	178
Cr	270	257	247	242	307	298	176
Co	48.1	53.2	47.6	45.1	47.2	62.2	35.6
Ni	111.0	116.0	89.7	94.6	104.0	135.0	74.2
Rb	10.600	0.653	1.510	4.040	0.492	53.300	4.060
Sr	111.0	117.0	56.3	60.7	54.8	180.0	85.3
Y	34.7	34.0	31.5	30.8	36.0	37.7	39.3
Nb	2.15	1.98	1.55	1.43	1.82	2.68	1.59
Cs	1.110	0.798	0.857	0.825	0.852	5.660	0.590
Ba	22.8	11.8	14.7	18.4	10.7	67.1	25.7
Ta	0.123	0.120	0.104	0.089	0.100	0.143	0.104
Th	0.268	0.221	0.136	0.130	0.161	0.248	0.137
U	0.057	0.153	0.051	0.016	0.043	0.047	0.373
Zr	74.5	66.6	59.4	67.3	84.9	91.7	74.3
Hf	2.25	2.07	1.85	1.97	2.54	2.51	2.32
Zr/Nb	34.65	33.64	38.32	47.06	46.65	34.22	46.73
Nb/La	0.74	0.69	0.67	0.68	0.72	0.83	0.63
Hf/Ta	18.29	17.25	17.79	22.13	25.40	17.55	22.31
Nb/Y	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.07	0.04
Zr/Y	2.15	1.96	1.89	2.19	2.36	2.43	1.89
Nb/Yb	0.55	0.53	0.42	0.40	0.43	0.60	0.38
Ta/Yb	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02

续表 1

样品号	11204/08	11204/09	11204/12	11204/15	11204/16	11204/18	11204/20
SiO <sub>2</sub>	47.71	47.29	42.22	46.05	48.36	48.73	47.34
TiO <sub>2</sub>	1.39	1.36	1.30	1.15	1.35	1.20	1.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.48	14.44	15.23	16.20	16.76	16.53	16.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.13	4.17	6.56	6.17	7.47	9.03	7.70
FeO	6.13	8.04	5.37	4.92	2.45	2.19	2.55
MnO	0.42	0.18	0.19	0.19	0.19	0.16	0.16
MgO	2.60	10.15	6.74	7.72	7.96	6.28	6.86
CaO	5.27	6.80	13.69	10.18	4.53	4.90	9.60
Na <sub>2</sub> O	6.16	0.42	2.49	3.35	5.85	6.03	4.12
K <sub>2</sub> O	0.79	0.38	0.03	0.14	0.07	0.29	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08
Mg <sup>#</sup>	43	69	69	74	85	84	83
La	3.08	3.29	3.31	2.52	1.44	2.57	2.09
Ce	7.08	10.30	10.10	7.97	5.72	7.51	6.88
Pr	1.70	1.73	1.77	1.46	1.00	1.42	1.22
Nd	11.00	9.96	10.30	8.66	6.18	8.26	7.45
Sm	4.51	3.61	3.62	3.30	2.46	2.96	2.86
Eu	1.680	1.390	1.360	1.240	0.884	1.240	1.090
Gd	5.91	4.58	4.17	3.80	3.00	3.49	3.44
Tb	1.470	0.983	0.999	0.890	0.723	0.842	0.826
Dy	9.90	6.15	6.22	5.85	4.81	5.45	5.46
Ho	2.06	1.28	1.34	1.29	1.06	1.18	1.14
Er	5.87	3.84	4.04	3.90	3.05	3.59	3.45
Tm	0.914	0.613	0.632	0.593	0.487	0.558	0.569
Yb	5.62	3.99	4.19	3.82	3.23	3.54	3.68
Lu	0.801	0.594	0.627	0.593	0.467	0.525	0.543
$\delta$ Eu	0.99	1.04	1.07	1.07	0.99	1.18	1.06
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.37	0.56	0.53	0.44	0.30	0.49	0.38
$\Sigma$ LREE	31.88	31.57	31.32	26.43	19.24	24.88	22.94
$\Sigma$ HREE	27.63	18.49	19.12	18.00	14.82	16.86	16.73
LREE/HREE	0.16	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.15
Sc	38.4	39.5	36.8	40.5	39.8	36.8	35.7
V	280	290	322	325	316	303	303
Cr	219	276	254	299	333	299	289
Co	47.0	54.5	50.8	47.7	50.0	47.0	46.5
Ni	96.1	134.0	107.0	86.1	79.7	87.7	73.0
Rb	14.800	8.510	0.610	3.220	1.000	5.480	2.110
Sr	55.9	76.0	130.0	154.0	127.0	147.0	142.0
Y	52.1	34.4	35.6	33.2	24.8	30.3	29.4
Nb	2.22	2.29	1.75	1.14	1.36	1.20	1.08
Cs	1.690	1.450	0.283	0.385	0.318	0.649	0.858
Ba	36.7	67.6	27.6	23.7	63.6	59.1	47.3
Ta	0.127	0.135	0.104	0.077	0.077	0.069	0.062
Th	0.202	0.194	0.184	0.157	0.104	0.223	0.106
U	0.793	0.053	0.125	0.071	0.258	0.192	0.063
Zr	79.7	56.3	76.2	65.3	70.4	59.3	62.3
Hf	2.38	2.02	2.21	2.07	2.12	1.77	1.98
Zr/Nb	35.90	24.59	43.54	57.28	51.76	49.42	57.69
Nb/La	0.72	0.70	0.53	0.45	0.94	0.47	0.52
Hf/Ta	18.74	14.96	21.25	26.88	27.53	25.65	31.94
Nb/Y	0.04	0.07	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04
Zr/Y	1.53	1.64	2.14	1.97	2.84	1.96	2.12
Nb/Yb	0.40	0.57	0.42	0.30	0.42	0.34	0.29
Ta/Yb	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

岩  $TiO_2$  值( $2.23\%$ )(Pearce, 1982),  $MgO$  含量介于  $2.16\% \sim 11.06\%$ ,  $Fe_2O_3^T$  含量介于  $9.92 \sim 12.26$ ,  $Mg^{\#}$  介于  $43 \sim 85$ , 主体大于  $68$ , 与原生岩浆  $Mg^{\#}$  值( $68 \sim 75$ )相近(Wilson, 1989), 表明岩浆没有发生明显的结晶分异作用。在  $SiO_2-(Zr/TiO_2) \times 10^{-4}$  关系(图 5a)中, 得力斯坦南玄武岩全部落入亚碱性玄武岩区域(Winchester and Floyd, 1977), 在  $TiO_2-Fe_2O_3^T/MgO$  关系(图 5b)中, 样品落入深海拉斑玄武岩和洋脊拉斑玄武岩系列, 而明显远离岛弧拉斑玄武岩和洋岛拉斑玄武岩区域(Miyake, 1985)。

#### 4.2 稀土元素

得力斯坦南玄武岩 LREE 介于  $17.68 \times 10^{-6} \sim 30.46 \times 10^{-6}$ , HREE 介于  $16.83 \times 10^{-6} \sim 32.55 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma REE$  介于  $34.51 \times 10^{-6} \sim 61.60 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 介于  $0.89 \sim 1.37$ .  $(La/Yb)_N$  介于  $0.30 \sim 0.56$ , 平均值为  $0.44$ ;  $(La/Sm)_N$  介于  $0.37 \sim 0.58$ , 平均值为  $0.50$ ;  $\delta Eu$  变化不大, 介于  $0.90 \sim 1.18$ , 主体位于  $1.00$  左右, 平均值为  $1.02$ , 表明岩石基本无  $Eu$  异常。球粒陨石标准化稀土元素配分图呈现轻稀土元素亏损的左倾型(图 6), 与 NMORB 型玄武岩稀土元素配分曲线基本相同, 而显著不同于 EMORB 和 OIB 玄武岩的稀土配分曲线特征(Sun and McDonough, 1989)。

#### 4.3 微量元素

得力斯坦南玄武岩  $Zr$  和  $Hf$  含量分别变化于  $56.3 \times 10^{-6} \sim 91.7 \times 10^{-6}$  和  $1.77 \times 10^{-6} \sim 2.54 \times 10^{-6}$ , 相当于 NMORB 的  $Zr$  和  $Hf$  的丰度(分别为  $74.0 \times 10^{-6}$  和  $2.05 \times 10^{-6}$ ), 明显小于 OIB 的  $Zr$  和  $Hf$  丰度( $280.0 \times 10^{-6}$  和  $7.80 \times 10^{-6}$ )。玄武岩的  $Nb$  和  $Ta$  丰度变化于  $1.08 \times 10^{-6} \sim 2.68 \times 10^{-6}$  和

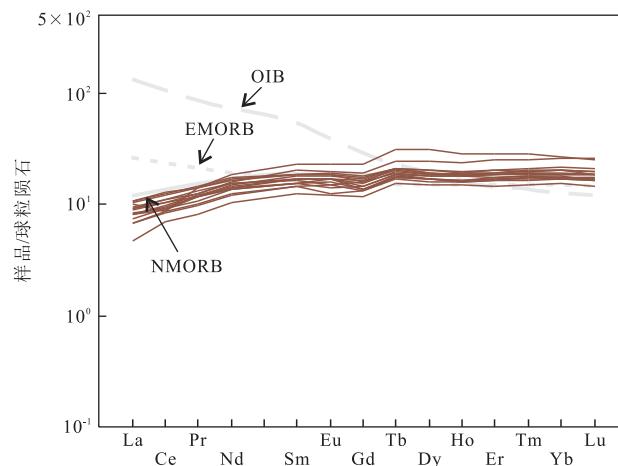


图 6 玄武岩球粒陨石标准化稀土元素配分图

Fig.6 Chondrite-normalized REE pattern for the basalts  
球粒陨石数值据 Boynton(1984)

$0.062 \times 10^{-6} \sim 0.143 \times 10^{-6}$ , 亦相当于 NMORB 的  $Nb$  和  $Ta$  的丰度(分别为  $2.33 \times 10^{-6}$  和  $0.132 \times 10^{-6}$ )(Sun and McDonough, 1989).  $Zr/Nb$  值介于  $24.59 \sim 57.69$ , 平均值为  $42.96$ ,  $Nb/La$  值介于  $0.45 \sim 0.94$ , 平均值为  $0.66$ ,  $Hf/Ta$  值介于  $18.29 \sim 31.94$ , 均大于  $5.00$ 。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 7), 曲线左侧强不相容元素( $Cs, Rb, Ba$ )较为富集, 且变化较大, 可能与岩石发生后期蚀变有关。 $U$  元素相对于相邻的  $Th$  和  $Nb$  元素呈明显富集状。高场强元素( $Nb, Ta, Zr, Hf$  等)基本未分异, 并贴近于 NMORB 标准线。总体而言, 微量元素原始地幔标准化蛛网图曲线从左向右随着元素不相容性降低, 除左端  $Cs, Rb, Ba$  元素之外曲线总体趋于平缓并呈左倾特征, 具有与 NMORB 型玄武岩相似的特征, 而明显不同于 EMORB 和 OIB 型玄武岩的特

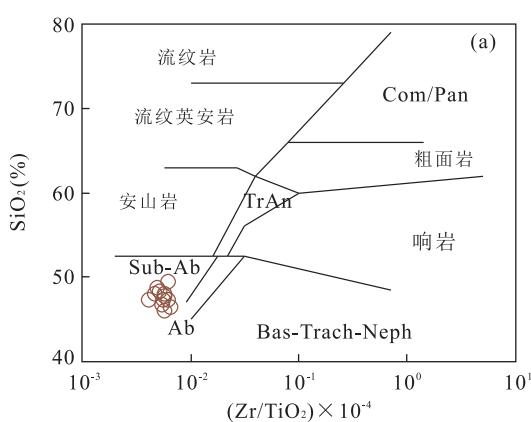


图 5 玄武岩  $(Zr/TiO_2) \times 10^{-4}-SiO_2$  (a) 和  $Fe_2O_3^T/MgO-TiO_2$  (b) 分类

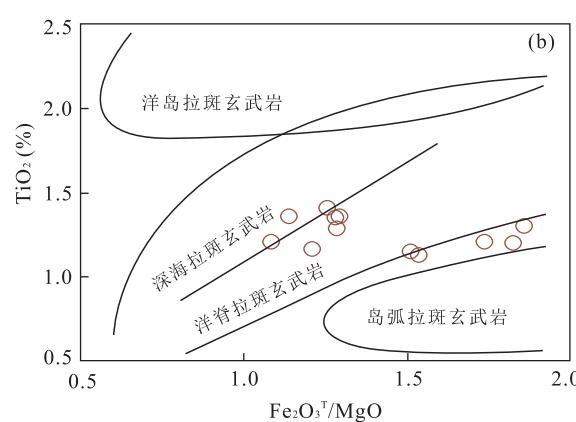


Fig.5 Plots of  $(Zr/TiO_2) \times 10^{-4}-SiO_2$  (a) and  $Fe_2O_3^T/MgO-TiO_2$  (b) for the basalts

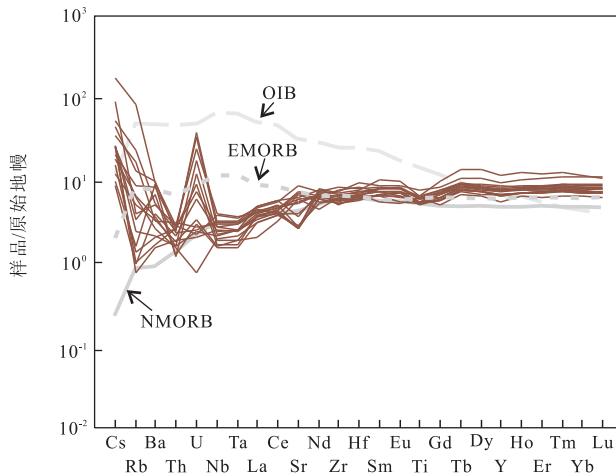


图 7 玄武岩原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace elements spidergram for the basalts

原始地幔数值据 Sun and McDonough(1989)

征(Sun and McDonough, 1989).

## 5 讨论

### 5.1 形成时代

得力斯坦南玄武岩—硅泥岩—碳酸盐岩组合呈透镜体状产出中下二叠统马尔争组中(图 1c),而马尔争组复理石沉积地层是构成布青山蛇绿混杂岩的基质,属于准原地系统,那么洋岛玄武岩产出时代应与马尔争组( $P_{1-2}m$ )沉积同时或更早。翼六祥和欧阳舒(2006)通过对马尔争组孢粉化石研究,认为马尔争组形成于早中二叠世;得力斯坦沟南与玄武岩伴生的细晶灰岩中获得 *Popanoceras* sp., *Karagalites* sp. 菊石动物化石,时代为早二叠世(中国地质大学(武汉),1:250 000 阿拉克湖幅区域地质调查报告,2002)。Zhang et al.(2000, 2004)在布青山—阿尼玛卿构造带东段花石峡地区紫红色硅泥质岩中获得放射虫动物群,主要种属为 *Pseudoalbaillella scalprata* m. *postscalprata* Ishiga, *Ps. scalprata* m. *scalprata* Ishiga, *Ps. elegans* Ishiga et Imoto, *Ps. sp. cf. Ps. simplex* Ishiga et Imoto, *Ps. sp.*, *Latentifistula* sp. cf. *L. patagilaterata* Nazarov et Ormiston 和 *Spumellaria*。根据放射虫的研究可以确定布青山—阿尼玛卿混杂岩带的深海硅泥质岩的形成时代为早二叠世。区域上,上述灰岩和硅泥岩层位于玄武岩之上,因此得力斯坦南玄武岩形成时代应早于早二叠世。此外,边千韬等(1999)获得布青山

地区蛇绿岩(其中玄武岩)的 Rb-Sr 等时线年龄为  $340.3 \pm 11.6$  Ma, 刘战庆等(2011a)获得布青山构造混杂带哈尔郭勒蛇绿岩年龄为  $332.8 \pm 3.1$  Ma, 二者年龄相近, 这些年龄表明布青山构造混杂带存在一条晚古生代石炭纪洋盆物质组合。因此, 综合前人成果, 笔者认为布青山—阿尼玛卿构造混杂带得力斯坦南玄武岩形成时代应为早石炭世。

### 5.2 构造环境

布青山构造混杂带出露有 2 种类型的玄武岩, 第 1 类玄武岩主要分布于构造混杂带北侧(图 1c), 岩石类型主要为枕状玄武岩或块状玄武岩, 且与蛇纹岩、辉长岩及深水硅泥岩相伴产出, 地质、地球化学属性显示其为蛇绿岩有机组成部分(Bian et al., 2004; 刘战庆等, 2011a, 2011b, 2011c); 第 2 类玄武岩主要出露于布青山构造混杂带南侧, 与厚层块状碳酸盐岩或紫红色薄层状硅泥岩相伴产出, 例如, 哥日卓托洋岛玄武岩(李瑞保等, 2014)、哈尔郭勒洋岛玄武岩(杨杰等, 2014)以及得力斯坦南玄武岩, 并且该类玄武岩岩石类型复杂多样, 包括角砾状玄武岩、块状玄武岩、气孔—杏仁状玄武岩及豆粒状玄武岩。此外, 得力斯坦南玄武岩未见与蛇纹岩及辉长岩共生, 而是与紫红色深水相硅泥岩或碳酸盐岩伴生, 借此说明该类玄武岩很可能不是蛇绿岩的组成单元, 而是类似于大洋盆地中的古海山岩石组合(Wang and Yang, 2004)(图 4)。在地球化学特征方面, 主量元素  $TiO_2$  含量介于 1.13% ~ 1.41%, 平均值为 1.27%, 与大洋拉斑玄武岩(1.50%)平均值接近, 明显高于活动陆缘和岛弧拉斑玄武岩平均值(0.83%)和小于洋岛玄武岩  $TiO_2$  值(2.00%)(Pearce and Norry, 1979)。得力斯坦南玄武岩微量元素 Nb、Ta、Zr、Hf 含量与 NMORB 相当,  $Zr/Nb$  值(24.59 ~ 57.69)、 $Nb/La$  值(0.45 ~ 0.94)和  $Hf/Ta$  值(18.29 ~ 31.94)亦与 NMORB 相关比值相似( $Zr/Nb$  值  $> 30$ ,  $Nb/La$  值  $< 1.0$ ,  $Hf/Ta$  值大于 5.0)(Wilson, 1989; Condie, 2003, 2005)。在  $(Nb/Th)_{N}$  -  $(Th/La)_{N}$  关系中(Godard et al., 2006)(图 8a), 样品落入洋壳扩张中心, 排除了与俯冲带相关的构造环境。在玄武岩  $Ti/1\,000-V$  关系中(Shervais, 1982)(图 8b), 样品全部落入 MORB 区域而远离洋岛玄武岩(OIB)和弧火山岩。在  $Ti-Zr$  关系(Pearce and Norry, 1979)(图 8c)和  $Zr-Zr/Y$  关系(Pearce and Norry, 1979)(图 8d)中, 样品无一例外地落入到 MORB 区域。以上得力斯坦南玄武岩的野外地质及地球化学特征表明其为 NMORB 型岩石, 形成于洋

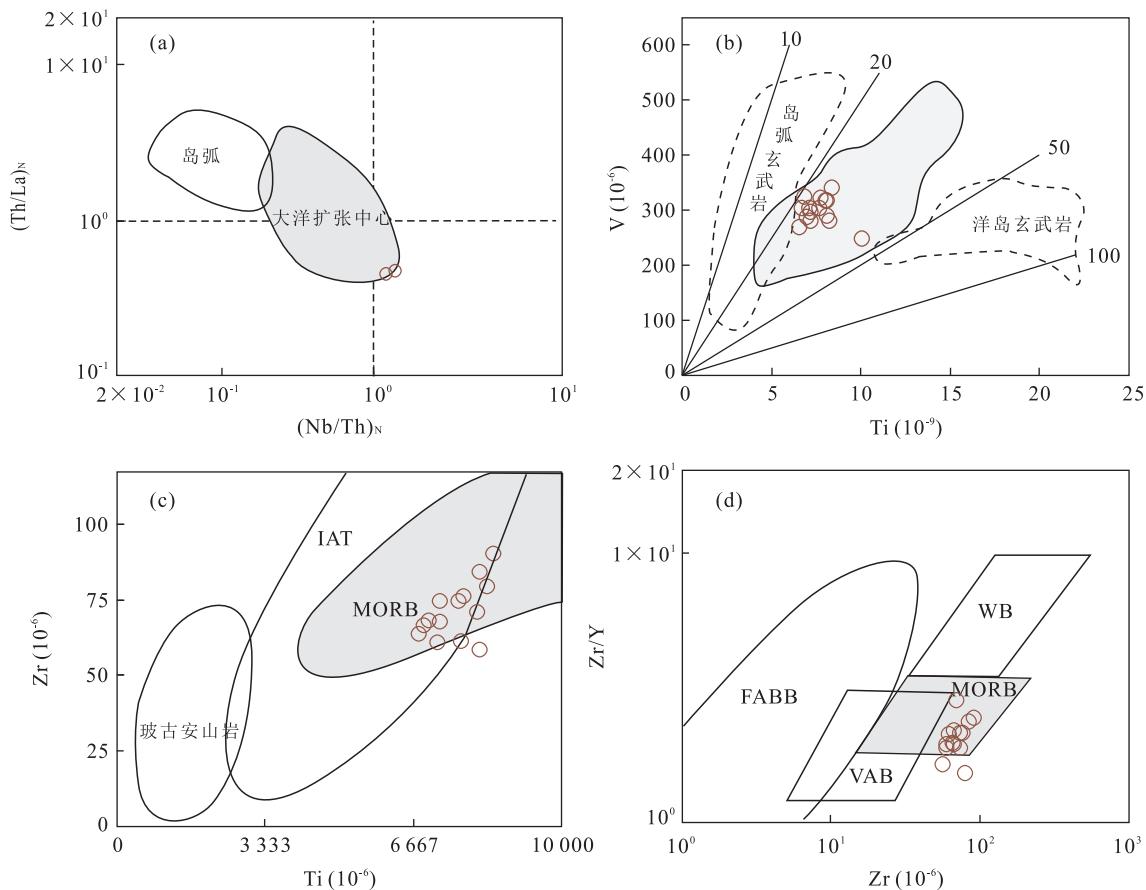
图 8 玄武岩  $(\text{Nb}/\text{Th})_N$ - $(\text{Th}/\text{La})_N$ (a)、 $\text{Ti}/1000$ - $V$ (b)、 $\text{Ti}-\text{Zr}$ (c) 和  $\text{Zr}-\text{Zr}/Y$ (d) 关系Fig.8 Plots of  $(\text{Nb}/\text{Th})_N$ - $(\text{Th}/\text{La})_N$ (a),  $\text{Ti}/1000$ - $V$  (b),  $\text{Ti}-\text{Zr}$  (c) and  $\text{Zr}-\text{Zr}/Y$ (d) for the basalts

图 8a 中 NMORB 标准化据 Sun and McDonough(1989)

中脊或由于洋脊扩张向两侧后移的洋中脊岛构造环境,在地形地貌上呈现为高出海底的海山,并在其上沉积有硅泥岩及浅水相碳酸盐岩(图 1c 和图 4).由此看来,得力斯坦南海山结构与前人曾报道的玛积地区(Guo *et al.*, 2007)、哥日卓托(李瑞保等, 2014)及哈尔郭勒(杨杰等, 2014)古海山结构不同,玛积及哥日卓托地区海山基座为具有 OIB 属性的玄武岩,而得力斯坦南古海山的基座则为具 NMORB 属性的基性火山岩.综上所述,结合前人区域资料认为布青山—阿尼玛卿构造带石炭纪的古海山或洋岛及蛇绿岩记录了位于冈瓦纳大陆与欧亚大陆之间东古特提斯洋北缘分支洋盆的发育(Stampfli and Borel, 2002; Metcalfe, 2006, 2013).

### 5.3 源区特征

由于玄武岩样品遭受后期碳酸盐化等蚀变作用,大离子亲石元素含量变化较大,故选用抗蚀变元素(如 Zr, Hf, Nb, Ta, Y 等元素)进行岩石成因研究.高场强微量元素比值可以有效区分原始岩浆演化过程中是否受流体或地壳混染,其地球化学特征

常常可以用来反演源区性质.  $\text{Nb}/Y$ 、 $\text{Zr}/Y$ 、 $\text{Nb}/\text{Yb}$  和  $\text{Ta}/\text{Yb}$  值对于分离结晶作用和部分熔融作用过程不敏感,其比值常常可以提供地幔源区性质(Pearce and Peate, 1995; Pearce, 2008).在  $\text{Zr}/Y-\text{Nb}/Y$  关系(图 9a)中,得力斯坦南玄武岩均落在靠近 NMORB 的地幔序列,表明这些元素主要受岩浆源区控制,后期地质过程(如流体或地壳混染)对其影响较弱(Weaver, 1991; Condie, 2003).通常认为,抽取完 NMORB 熔体的亏损地幔(DM)具有较低的不相容元素比值,例如  $\text{Nb}/Y$ 、 $\text{Zr}/Y$ 、 $\text{Nb}/\text{Yb}$  和  $\text{Ta}/\text{Yb}$ ,而相对较高的不相容元素比值则代表源区为富集地幔(Condie, 2003).得力斯坦南玄武岩相关微量元素比值较低,  $\text{Nb}/Y$  介于  $0.03 \sim 0.07$ ,  $\text{Zr}/Y$  介于  $1.53 \sim 2.84$ ,  $\text{Nb}/\text{Yb}$  介于  $0.29 \sim 0.60$ ,  $\text{Ta}/\text{Yb}$  介于  $0.02 \sim 0.03$ ,与 NMORB 地幔源区相当,而显著不同于富集地幔源区(Pearce and Peate, 1995; Pearce, 2008).在  $\text{Zr}/Y-\text{Nb}/Y$  关系中(图 9a),样品主体落入北半球参考线(NHRL)之下,靠近 NMORB 和亏损地幔(DM)的范围,表明岩石起源于亏损地幔

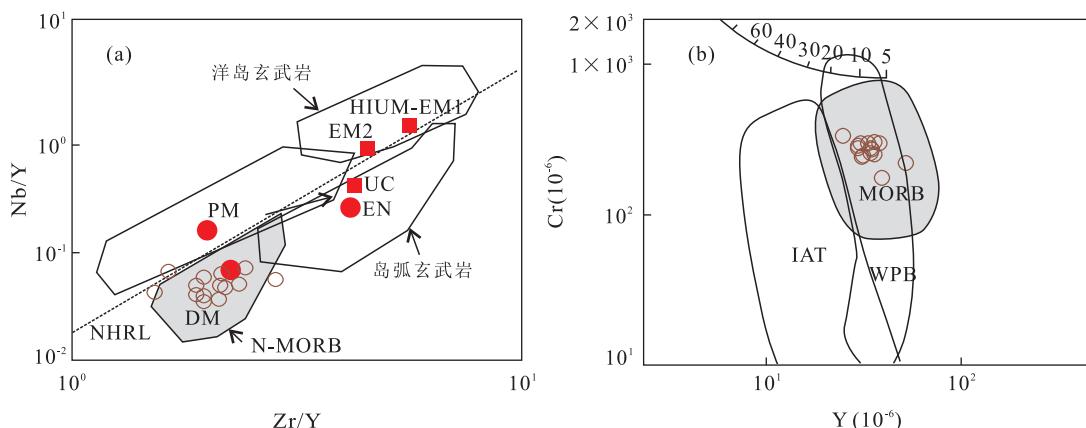


图 9 得力斯坦南玄武岩 Zr/Y-Nb/Y(a) 和 Y-Cr(b) 关系

Fig.9 Plot of Zr/Y-Nb/Y (a) and Y-Cr (b) for the basalts

UC. 土地壳; EN. 富集组分; PM. 原始地幔; DM. 亏损地幔; HIMU. 高 U 值地幔; EM1. EM1 型富集地幔; EM2. EM2 型富集地幔; NMORB. 正常洋中脊玄武岩; MORB. 洋中脊玄武岩; WPA. 板内玄武岩; IAT. 岛弧玄武岩; 部分熔融趋势线由二辉橄榄岩模拟

(DM) 而非富集地幔源区 (EM)。在 Y-Cr 关系中 (Malpas *et al.*, 1994) (图 9b), 样品全部落入 MORB 区域, 表明岩石起源于一个共同的初始地幔熔体, 并估算其为由地幔二辉橄榄岩发生 10% 左右部分熔融的产物。

由此看来, 笔者在综合前人资料基础上认为布青山构造混杂带中石炭纪洋盆板内岩浆作用可分为 3 种类型, 对应于 3 种不同的岩浆源区, 分别为以哥日卓托洋岛玄武岩为代表的地幔柱型 (李瑞保等, 2014)、以哈尔郭勒洋岛玄武岩为代表的地幔柱与洋中脊叠加型 (杨杰等, 2014) 以及本文厘定的洋中脊型。该认识丰富了古洋盆板内玄武岩岩石成因机制及板内岩浆作用类型, 具有一定的理论意义。

## 6 结论

(1) 得力斯坦南玄武岩岩石组合复杂多样, 主要由块状玄武岩、枕状玄武岩、气孔—杏仁状玄武岩和角砾状玄武岩组成, 其上覆盖有紫红色薄层状深水相硅泥岩及碳酸盐岩, 与洋岛或海山在物质组成与结构上相类似。

(2) 得力斯坦南玄武岩主量元素特征表明其属于亚碱性系列, 与深海拉斑玄武岩特征相似。稀土元素球粒陨石标准化配分图表现为轻稀土元素亏损、重稀土元素富集曲线左倾特征, 原始地幔标准化微量元素蛛网图表现出与 NMORB 相似的曲线型态, 微量元素构造环境判别图解表明其形成于洋中脊或由于洋脊扩张向两侧后移的洋中脊构造环境。

(3) 岩石成因研究表明得力斯坦南玄武岩主要

受岩浆源区控制, 后期地质过程 (如流体或地壳混染) 对其影响较弱, 所有样品均落入 NMORB 和亏损地幔 (DM) 的范围, 而非富集地幔源区 (EM)。所有样品起源于一个共同的初始地幔熔体, 估算其为由地幔二辉橄榄岩发生 10% 的部分熔融的产物。

致谢: 一起参加野外工作的还有丁仁平教授级高级工程师、郭俊峰副教授、冯建贊博士、张亚峰、刘智刚、张晓飞、杨忠智、张刚、胡楠和杨杰硕士等, 部分图件由邓文兵硕士绘制, 在此表示诚挚的谢意。

## References

- Bian, Q.T., Luo, X.Q., Li, H.S., et al., 1999. Discovery of Early Paleozoic and Early Carboniferous-Early Permian Ophiolites in the A'nyemaqen, Qinghai Province, China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 513–524 (in Chinese with English abstract).
- Bian, Q.T., Yin, L.M., Sun, S.F., et al., 2001. Discovery of Ordovician Acritarchs in Buqingshan Ophiolite Complex, East Kunlun Mountains and Its Significance. *Chinese Science Bulletin*, 46(4): 341–345.
- Bian, Q.T., Li, D.H., Pospelov, I., et al., 2004. Age, Geochemistry and Tectonic Setting of Buqinshan Ophiolites, North Qinghai-Tibet Plateau, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 577–596.
- Boynton, W.V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 63–114.
- Chen, F.K., Hegner, E., Todt, W., 2000. Zircon Ages, Nd Isotopic and Chemical Compositions of Orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian

- Magmatic Arc. *International Journal of Earth Sciences*, 88:791—802.
- Chen, F.K., Siebel, W., Satir, M., et al., 2002. Geochronology of the Karadere Basement (NW Turkey) and Implications for the Geological Evolution of the Istanbul Zone. *International Journal of Earth Sciences*, 91:469—481.
- Chen, L., Sun, Y., Pei, X.Z., et al., 2004. Comparison of Eastern Paleo-Tethyan Ophiolites and Its Geodynamic Significance—Evidence from A'nyemaqen Ophiolite. *Science in China (Series D)*, 47(4):378—384.
- Condie, K.C., 2003. Incompatible Element Ratios in Oceanic Basalts and Komatiites: Tracking Deep Mantle Sources and Continental Growth Rates with Time. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(1):1—28.
- Condie, K.C., 2005. High Field Strength Element Ratios in Archean Basalts: A Window to Evolving Sources of Mantle Plumes? *Lithos*, 79:491—504.
- Dong, Y.P., Zhang, G.W., Franz, N., et al., 2011. Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, China: Review and Synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41:213—237.
- Godard, M., Bosch, D., Einaudi, F., 2006. AMORB Source for Low-Ti Magmatism in the Semail Ophiolite. *Chemical Geology*, 234:58—78.
- Guo, A.L., Zhang, G.W., Sun, Y.G., et al., 2007. Geochemistry and Spatial Distribution of OIB and MORB in A'nyemaqen Ophiolite Zone: Evidence of Majixueshan Ancient Ridge-Centered Hotspot. *Science in China (Series D)*, 50(2):197—208.
- Hu, N., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2013. Provenance and Tectonic Setting Study of the Maerzheng Formation at the Delistan of Buqingshan Area in the Southern Margin of East Kunlun. *Acta Geologica Sinica*, 87(11):1731—1747 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, G.L., Zhang, S.M., Liu, K.F., et al., 2014. Evolution of Neoproterozoic-Mesozoic Sedimentary Basins in Qilian-Qaidam-East Kunlun. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(8):1000—1016 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2014.091
- Ji, L.X., Ouyang, S., 1996. Spore-Pollen Assemblage from Buqingshan Group in Qinghai and Its Geological Age. *Acta Palaeontologica Sinica*, 35(1):1—25 (in Chinese with English abstract).
- Lai, S.C., Qin, J.F., 2010. Ophiolites and Volcanic Rocks in the Mianlue Suture Belt of Qinling. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Lai, S.C., Zhang, G.W., Pei, X.Z., 2002. Geochemistry of the Pipasi Ophiolite in the Mianlue Suture Zone, South Qinling, and Its Tectonic Significance. *Geological Bulletin of China*, 21(8—9):465—470 (in Chinese with English abstract).
- Li, B.L., Sun, F.Y., Yu, X.F., et al., 2012. U-Pb Dating and Geochemistry of Diorite in the Eastern Section from Eastern Kunlun Middle Uplifted Basement and Granite Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4):1163—1172 (in Chinese with English abstract).
- Li, C., Zhai, Q.G., Dong, Y.S., et al., 2007. Lungmu Co-Shanghu Plate in the Qinghai-Tibet Plateau and Records of the Evolution of the Paleo-Tethys Ocean in the Qiangtang Area of Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 26(1):13—21 (in Chinese with English abstract).
- Li, R.B., 2012. Research on the Late Paleozoic-Early Mesozoic Orogeny in East Kunlun Orogen (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Li, R.B., Pei, X.Z., Li, Z.C., et al., 2012. Geological Characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic Unconformities and Their Response to Some Significant Tectonic Events in Eastern Part of Eastern Kunlun. *Earth Science Frontiers*, 19(5):244—254 (in Chinese with English abstract).
- Li, R.B., Pei, X.Z., Li, Z.C., et al., 2013a. Geochemical and Geochronological Characteristics of Kekekete Mafic-Ultramafic Rocks and Its Tectonic Significance, Eastern Section of East Kunlun Orogeny. *Acta Geologica Sinica*, 87(5):1319—1333.
- Li, R.B., Pei, X.Z., Li, Z.C., et al., 2013b. Regional Tectonic Transformation in East Kunlun Orogenic Belt in Early Paleozoic: Constraints from the Geochronology and Geochemistry of Helegangnaren Alkali-Feldspar Granite. *Acta Geologica Sinica*, 87(2):333—345.
- Li, R.B., Pei, X.Z., Li, Z.C., et al., 2014. Geochemical Characteristics of Gerizhuotuo OIB and Its Tectonic Significance in Buqingshan Tectonic Mélange Belt, Southern Margin of East Kunlun Orogen. *Earth Science Frontiers*, 21(1):183—195 (in Chinese with English abstract).
- Li, W.Y., Li, S.G., Guo, A.L., et al., 2007. Zircon SHRIMP U-Pb Ages and Trace Element Geochemistry of the Kuhai Gabbro and the Dur'ngoi Diorite in the Southern East Kunlun Tectonic Belt, Qinghai, Western China and Their Geological Implications. *Science in China (Series D)*, 50(Suppl. II):331—338.
- Li, Z.C., Pei, X.Z., Liu, Z.Q., et al., 2013. Geochronology and Geochemistry of the Gerizhuotuo Diorites from the Buqingshan Tectonic Mélange Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Their Geologic Implica-

- tions. *Acta Geologica Sinica*, 87(8): 1089—1103 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Ma, C.Q., Jiang, H.A., et al., 2013. Early Paleozoic Tectonic Transition from Ocean Subduction to Collisional Orogeny in the Eastern Kunlun Region: Evidence from Huxiaoqin Mafic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2093—2106 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Ma, C.Q., Guo, P., et al., 2013b. Discovery of the Middle Devonian A-Type Granite from the Eastern Kunlun Orogen and Its Tectonic Implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(5): 947—962 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.Q., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2011a. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of the Two Suites of Ophiolites at the Buqingshan Area of the A'nyemaqen Orogenic Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Its Tectonic Implication. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 185—194 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.Q., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2011b. Geological Characteristics of the Buqingshan Tectonic Melange Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Its Tectonic Implications. *Geological Bulletin of China*, 30(8): 1182—1195 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.Q., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2011c. Early Paleozoic Intermediate-Acid Magmatic Activity in Bairiqi Area along the Buqingshan Tectonic Mélange Belt on the Southern Margin of East Kunlun: Constraints from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Geology in China*, 38(5): 1150—1167 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C.Q., Xiong, F.H., Zhang, J.Y., et al., 2013. The Effects of Subduction Plate of Magmatism in the Stage of Plate Subduction to Post-Tectonic: Evidence of Mafic Dikes of Early Permian-Late Triassic East Kunlun. *Acta Geologica Sinica*, 87(Suppl.): 79—81 (in Chinese).
- Malpas, J., Calon, T.J., MacDonald, R.W.J., 1994. The Shulaps Ophiolite Complex of British Columbia, Canada: A Palaeozoic/Mesozoic Arc-Related Microterrane. In: Nishiyama, T., ed., Proceedings of the 29th International Geological Congress. VSP International Science Publishers, Kyoto, 69—87.
- Meng, F.C., Zhang, J.X., Cui, M.H., et al., 2013. Discovery of Early Paleozoic Eclogite from the East Kunlun, Western China and Its Tectonic Significance. *Gondwana Research*, 23: 825—836.
- Metcalfe, I., 2006. Palaeozoic and Mesozoic Tectonic Evolution and Palaeogeography of East Asian Crustal Fragments: The Korean Peninsula in Context. *Gondwana Research*, 9: 24—46.
- Metcalfe, I., 2013. Gondwana Dispersion and Asian Accretion: Tectonic and Palaeogeographic Evolution of Eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1—33. doi: org/10.1016/j.jseas.2012.12.020
- Miyake, Y., 1985. Morb-Like Tholeiites Formed within the Miocene Forearc Basin, Southwest Japan. *Lithos*, 18: 23—34.
- Pearce, J.A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In: Thorpe, R.S., ed., *Orogenic Andesites and Related Rocks*. John Wiley and Sons, New York, 528—548.
- Pearce, J.A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100: 14—48.
- Pearce, J.A., Norry, M.J., 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y and Nb Variations in the Volcanic Rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69: 33—47.
- Pearce, J.A., Peate, D.W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic Arc Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251—285.
- Pei, X.Z., 2001. Geological Evolution and Dynamics of the Mianlue- A'nyemaqen Tectonic Zone, Central China (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Pei, X.Z., Hu, N., Liu, C.J., et al., 2015. Detrital Composition, Geochemical Characteristics and Provenance Analysis for the Maerzheng Formation Sandstone in Gerizhuotuo Area, Southern Margin of East Kunlun Region. *Geological Review*, 61(2): 303—323 (in Chinese with English abstract).
- Shervais, J.W., 1982. Ti-V Plots and the Petrogenesis of Modern and Ophiolite Lavas. *Earth and Planetary Science Letters*, 59: 101—118.
- Stampfli, G.M., Borel, G.D., 2002. A Plate Tectonic Model for the Paleozoic and Mesozoic Constrained by Dynamic Plate Boundaries and Restored Synthetic Oceanic Isochrones. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1—2): 17—33.
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A.D., Norry, M.J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, London, 313—345.
- Wang, B.Z., Zhang, Z.Y., Zhang, S.Q., et al., 2000. Geological Features of Lower Paleozoic Ophiolite in Kunhai-Saishitang Region, Eastern Section of Eastern Kunlun. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25

- (6):592—598 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G.C., Zhang, T.P., Liang, B., et al., 1999. Composite Ophiolite Mélange Zone in Central Part of Eastern Section of Eastern Kunlun Orogenic Zone and Geological Significance of “Fault Belt in Central Part of Eastern Section of Eastern Kunlun Orogenic Zone”. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(2):129—133 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B., Yang, H., 2004. Middle Permian Palaeobiogeography Study in East Kunlun, A'nyēmaqēn and Bayan Har. *Science in China (Series D)*, 47(12): 1120—1126.
- Weaver, B.L., 1991. The Origin of Ocean Island Basalt End-Member Compositions: Trace Element and Isotopic Constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104:381—397.
- Wilson, B.M., 1989. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach. Chapman and Hall, London.
- Winchester, J.A., Floyd, P.A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20:325—343.
- Xiong, F.H., Ma, C.Q., Zhang, J.Y., et al., 2012. The Origin of Mafic Microgranular Enclaves and Their Host Granodiorites from East Kunlun, Northern Qinghai-Tibet Plateau: Implications for Magma Mixing during Subduction of Paleo-Tethyan Lithosphere. *Mineralogy and Petrology*, 104(3—4): 211—224. doi: 10.1007/s00710-011-0187-1
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Li, W.C., et al., 2013. Paleo-Tethys System and Accretionary Orogen in the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1847—1860 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z., Bian, Q.T., Korchagin, O.A., et al., 2008. Provenance of Early Triassic Hongshuihuan Formation in the Southern Margin of the East Kunlun Mountains; Constraints from Detrital Framework, Heavy Mineral Analysis and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1068—1078 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z., Wang, Z.Q., Li, J.L., et al., 2012. Tectonic Settings and Accretionary Orogenesis of the West Qinling Terrane, Northeastern Margin of the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1808—1828 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J.S., Robison, P.T., Jiang, C.F., et al., 1996. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and Their Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 258:215—231.
- Yang, J.S., Shi, R.D., Wu, C.L., et al., 2009. Dur'ngoi Ophiolite in East Kunlun, Northeast Tibetan Plateau: Evidence for Paleo-Tethyan Suture in Northwest China. *Journal of Earth Science*, 20(2):303—331.
- Yang, J.S., Wang, X.B., Shi, R.D., et al., 2004. The Dur'ngoi Ophiolite in East Kunlun, Northern Qinghai-Tibet Plateau: A Fragment of Paleo-Tethyan Oceanic Crust. *Geology in China*, 31(3):225—239 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2014. Geochemical Characteristics and Geological Implications of Haerguole Basalt in Buqingshan Area on the Southern Margin of East Kunlun Mountains. *Geology in China*, 41(2):335—350 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K.X., Huang, J.C., Yin, H.F., et al., 2000. Application of Radiolarians and Other Fossils in Non-Smith Strata—Exemplified by the A'nyēmaqēn Melange Belt in East Kunlun Mts. *Science in China (Series D)*, 43(4): 364—374.
- Zhang, K.X., Lin, Q.X., Zhu, Y.H., et al., 2004. New Paleontological Evidence on Time Determination of the East Part of the Eastern Kunlun Mélange and Its Tectonic Significance. *Science in China (Series D)*, 47(10): 865—873.
- Zhang, Z. Y., Yin, H. F., Wang, B. Z., et al., 2004. Presence and Evidence of Kuhai-Saishitang Branching Ocean in Conjunction between Kunlun-Qinling Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6):691—696 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y.H., Zhang, K.X., Chen, N.S., et al., 1999. Determination of Different Ophiolites Belts of the East Kunlun Orogenic Belt and Its Tectonic Implication. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(2):134—138 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 边千韬,罗小全,李红生,等,1999.阿尼玛卿山早古生代和早石炭世—早二叠世蛇绿岩的发现.地质科学, 34(4): 513—524.
- 胡楠,裴先治,李瑞保,等,2013.东昆仑南缘布青山得力斯坦地区马尔争组物源分析及其构造背景研究.地质学报, 87(11):1731—1747.
- 姜高磊,张思敏,柳坤峰,等,2014.祁连—柴达木—东昆仑新元古—中生代沉积盆地演化.地球科学——中国地质大学学报, 39(8): 1000—1016.
- 冀六祥,欧阳舒,1996.青海中东部布青山群孢粉组合及其时代.古生物学报, 35(1):1—25.
- 赖绍聰,秦江峰,2010.秦岭勉略缝合带蛇绿岩与火山岩.北京:科学出版社.
- 赖绍聰,张国伟,裴先治,2002.南秦岭勉略结合带琵琶寺洋

- 壳蛇绿岩的厘定及其大地构造意义.地质通报,21(8—9):465—470.
- 李碧乐,孙丰月,于晓飞,等,2012.东昆仑隆起带东段闪长岩 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究.岩石学报,28(4):1163—1172.
- 李才,翟庆国,董永胜,等,2007.青藏高原龙木错—双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录.地质通报,26(1):13—21.
- 李瑞保,2012.东昆仑造山带(东段)晚古生代—早中生代造山作用研究(博士学位论文).西安:长安大学.
- 李瑞保,裴先治,李佐臣,等,2012.东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应.地学前缘,19(5):244—254.
- 李瑞保,裴先治,李佐臣,等,2014.东昆仑南缘布青山构造混杂带哥日卓托洋岛玄武岩地球化学特征及构造意义.地球前缘,21(1):183—195.
- 李佐臣,裴先治,刘战庆,等,2013.东昆仑南缘布青山构造混杂岩带哥日卓托闪长岩体年代学、地球化学特征及其地质意义.地质学报,87(8):1089—1103.
- 刘彬,马昌前,蒋红安,等,2013a.东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换:来自胡晓钦镁铁质岩石的证据.岩石学报,29(6):2093—2106.
- 刘彬,马昌前,郭盼,等,2013b.东昆仑中泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造意义.地球科学——中国地质大学学报,38(5):947—962.
- 刘战庆,裴先治,李瑞保,等,2011a.东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义.地质学报,85(2):185—194.
- 刘战庆,裴先治,李瑞保,等,2011b.东昆仑南缘布青山构造混杂岩带的地质特征及大地构造意义.地质通报,30(8):1182—1195.
- 刘战庆,裴先治,李瑞保,等,2011c.东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动:来自锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学证据.中国地质,38(5):1150—1167.
- 马昌前,熊富浩,张金阳,等,2013.从板块俯冲到造山后阶段俯冲板片对岩浆作用的影响:东昆仑早二叠世—晚三叠世镁铁质岩墙群的证据.地质学报,87(增刊):79—81.
- 裴先治,2001.勉略—阿尼玛卿构造带的形成演化与动力学特征(博士学位论文).西安:西北大学.
- 裴先治,胡楠,刘成军,等,2015.东昆仑南缘哥日卓托地区马尔争组砂岩碎屑组成、地球化学特征与物源构造环境分析.地质论评,61(2):307—323.
- 王秉璋,张智勇,张森琦,等,2000.东昆仑东端苦海—塞什塘地区晚古生代蛇绿岩的特征.地球科学——中国地质大学学报,25(6):592—598.
- 王国灿,张天平,梁斌,等,1999.东昆仑造山带东段昆中复合蛇绿混杂岩带及“东昆中断裂带”地质涵义.地球科学——中国地质大学学报,24(2):129—133.
- 许志琴,杨经绥,李文昌,等,2013.青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用.岩石学报,29(6):1847—1860.
- 闫臻,边千韬,Korchagin, O.A.,等,2008.东昆仑南缘早三叠世洪水川组的源区特征:来自碎屑组成、重矿物和岩石地球化学的证据.岩石学报,24(5):1068—1078.
- 闫臻,王宗起,李继亮,等,2012.西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程.岩石学报,28(6):1808—1828.
- 杨经绥,王希斌,史仁灯,等,2004.青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩:一个被肢解了的古特提斯洋壳.中国地质,31(3):225—239.
- 杨杰,裴先治,李瑞保,等,2014.布青山构造混杂带哈尔郭勒洋岛玄武岩地质、地球化学特征及构造意义.中国地质,41(2):335—350.
- 张智勇,殷鸿福,王秉璋,等,2004.昆秦接合部海西期苦海—塞什塘分支洋的存在及证据.地球科学——中国地质大学学报,29(6):691—696.
- 朱云海,张克信,陈能松,等,1999.东昆仑造山带不同蛇绿岩带的厘定及其构造意义.地球科学——中国地质大学学报,24(2):134—138.