

# 东昆仑南缘布青山地区哈尔郭勒玄武岩 地球化学特征及其地质意义

杨杰<sup>1</sup> 裴先治<sup>1,2</sup> 李瑞保<sup>1,2</sup> 李佐臣<sup>1,2</sup> 刘战庆<sup>3</sup> 裴磊<sup>4</sup>  
刘成军<sup>1</sup> 陈有炘<sup>1</sup> 陈国超<sup>1</sup> 高景民<sup>1</sup>

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004;  
4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:**哈尔郭勒玄武岩位于东昆仑南缘布青山地区。详细的地球化学研究表明哈尔郭勒玄武岩可以分为碱性玄武岩和亚碱性玄武岩, 其中碱性玄武岩的  $\Sigma \text{LREE}=63.8 \times 10^{-6} \sim 175.36 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma \text{HREE}=14.46 \times 10^{-6} \sim 28.56 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}=4.41 \sim 6.14$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N=4.14 \sim 6.71$ ,  $(\text{Ce}/\text{Yb})_N=3.31 \sim 5.12$ ,  $\delta \text{Eu}=1.03 \sim 1.17$ , 具有与洋岛玄武岩(OIB)相似的稀土配分模式; 亚碱性玄武岩的  $\Sigma \text{LREE}=11.07 \times 10^{-6} \sim 29.95 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma \text{HREE}=12.56 \times 10^{-6} \sim 25.41 \times 10^{-6}$ ,  $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE}=0.88 \sim 1.54$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N=0.29 \sim 0.74$ ,  $(\text{Ce}/\text{Yb})_N=0.37 \sim 0.77$ ,  $\delta \text{Eu}=1.02 \sim 1.22$ , 具有正常洋中脊玄武岩(N-MORB)的稀土元素地球化学特征。这表明哈尔郭勒玄武岩是 OIB 与 N-MORB 的共生组合。布青山地区哈尔郭勒玄武岩中的 OIB 形成于洋脊附近的海山或洋岛环境, 岩浆源区可能为 EM II 型富集地幔; N-MORB 形成于洋脊环境, 起源于亏损地幔。哈尔郭勒玄武岩为布青山地区晚古生代存在洋盆提供了更充分的证据。

**关键词:**布青山; 哈尔郭勒; 玄武岩; OIB; N-MORB

**中图分类号:** P584; P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)02-0335-16

中央造山带是中国大陆一条十分醒目而又极其重要的巨型构造带, 由东向西可划分为大别—苏鲁造山带、东秦岭造山带、西秦岭造山带、祁连造山带、东昆仑造山带和西昆仑造山带, 是研究复合造山机制的理想天然试验场<sup>[1]</sup>。位于东昆仑造山带、西秦岭造山带和巴颜喀拉造山带交汇部位的阿尼玛卿构造带是研究中央造山带的关键地区之一, 阿尼玛卿构造带东起玛曲县, 经东昆仑南缘的玛沁德尔尼、花石峡和布青山, 西延至东大滩南黑茨沟附近<sup>[2-4]</sup>。前人对阿尼玛卿构造带做了大量的研究工作, 认为阿尼玛卿构造带存在早古生代蛇绿岩<sup>[5-7]</sup>和晚古生代蛇

绿岩<sup>[5,7-14]</sup>, 甚至还有观点认为阿尼玛卿构造带存在晚二叠世—中三叠世的第三期蛇绿岩<sup>[15-18]</sup>。阿尼玛卿构造带不仅存在大量蛇绿岩, 还存在早古生代的岛弧型岩浆岩<sup>[19-22]</sup>、晚古生代洋岛或海山玄武岩<sup>[13,23]</sup>及晚三叠世闪长岩<sup>[24]</sup>, 这些都说明阿尼玛卿构造带具有十分复杂的物质组成和演化历史。

对于阿尼玛卿构造带的海山或洋岛玄武岩前人已做过一定的研究工作。王永标<sup>[23]</sup>在研究巴颜喀拉和阿尼玛卿地区中二叠世古海山时, 认为阿尼玛卿构造带的布青山地区古海山玄武岩具有典型未经分异的洋脊玄武岩即 MORB 的地球化学特征。

**收稿日期:** 2013-05-13; **改回日期:** 2013-08-02

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41172186)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1271091、2013G1271092、CHD2011TD020)、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(中铝基金 200801)共同资助。

**作者简介:** 杨杰, 男, 1987 年生, 硕士生, 主要从事构造地质学研究; E-mail: yangjierz@163.com。

**通讯作者:** 裴先治, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事构造地质学和区域地质研究; E-mail: peixzh@263.net。

刘战庆<sup>[25]</sup>对布青山地区得力斯坦南海山玄武岩进行了地球化学研究,亦认为布青山地区得力斯坦南玄武岩具有N-MORB的地球化学特征。笔者等在1:5万区域地质填图时于阿尼玛卿—布青山构造带西段的布青山地区发现了具有枕状熔岩—碳酸盐岩顶盖双层结构类型的古海山,该海山基座为玄武岩,顶盖为灰岩。本文通过对布青山地区哈尔郭勒玄武岩的地球化学研究,发现布青山地区古海山玄武岩类型不仅有洋脊型玄武岩(MORB),还有洋岛型玄武岩(OIB),且布青山地区哈尔郭勒玄武岩形成时代应该为晚古生代。这一发现对恢复该地区晚古生代与古特提斯洋有关的地质演化历史提供

了更充分的证据。

## 1 区域地质背景

东昆仑造山带东段南缘的阿尼玛卿—布青山构造带位于青藏高原东北缘,是东昆仑造山带与巴颜喀拉山造山带的交接部位,地质构造和物质组成较为复杂。阿尼玛卿—布青山构造带北以东昆南断裂带为界与东昆南构造带相隔,南以布青山南坡断裂与可可西里—巴颜喀拉造山带毗邻,整体呈近东西向展布,西窄东宽,呈狭长楔形向西尖灭于格尔木南纳赤台一带(图1)。张国伟<sup>[26]</sup>、裴先治等<sup>[10,27]</sup>认为阿尼玛卿—布青山构造带属于整个勉略构造

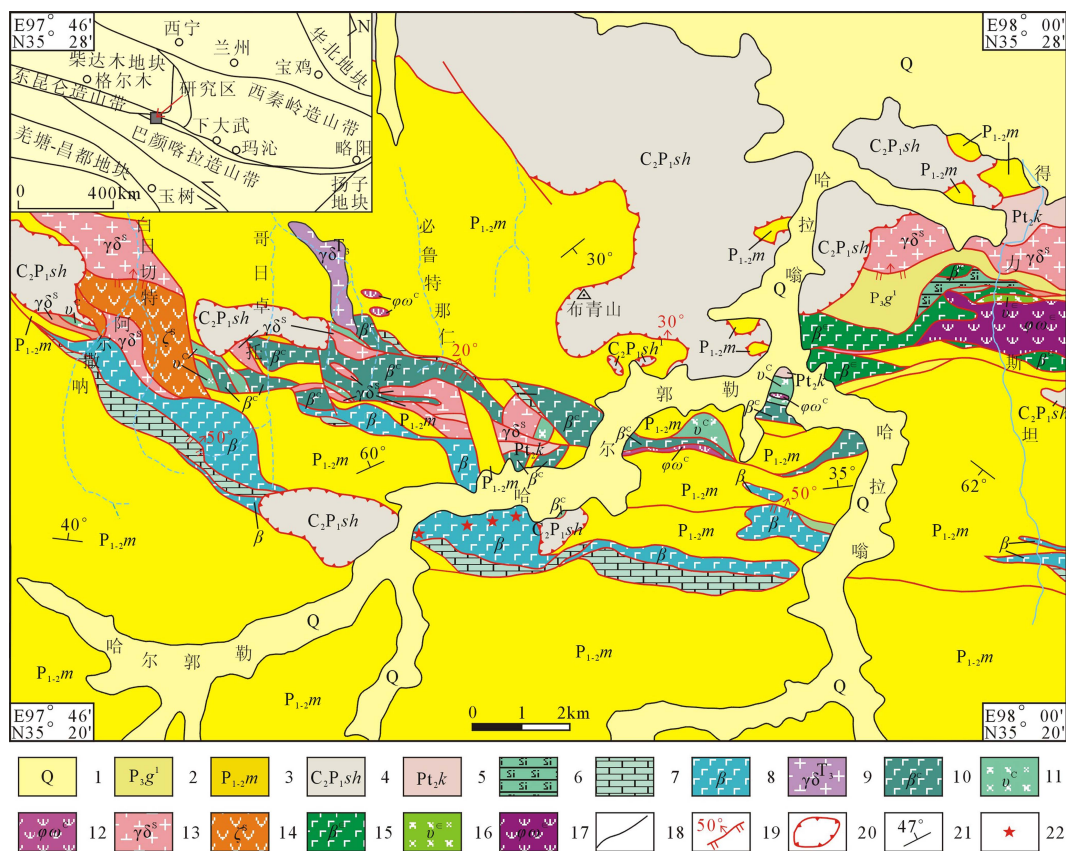


图1 布青山地区地质简图

- 1—第四系;2—上二叠统格曲组;3—中下二叠统马尔争组;4—上石炭统—下二叠统树维门科组;5—中元古界苦海岩群;  
6—硅质岩;7—海山灰岩;8—海山玄武岩;9—晚三叠世花岗岩闪长岩;10—12—石炭纪哈尔郭勒蛇绿岩;10—玄武岩;  
11—辉长岩;12—蛇纹岩;13—志留纪花岗岩闪长岩;14—志留纪英安岩;15—17—寒武纪得利斯蛇绿岩;15—玄武岩;  
16—辉长岩;17—蛇纹岩;18—地质界线;19—逆断层;20—推覆断层;21—层理及产状;22—采样位置

Fig.1 Simplified geological map of Buqingshan area

- 1—Quaternary; 2—Upper Permian Gequ Formation; 3—Middle and Lower Permian Maerzheng Formation; 4—Upper Carboniferous—Lower Permian Shuweimenke Formation; 5—Mesoproterozoic Kuhai Group; 6—Silicon shale; 7—Seamount limestone; 8—Seamount basalt; 9—Late Triassic granodiorite; 10—12—Carboniferous Harguole ophiolite; 10—Basalt; 11—Gabbro; 12—Serpentinite; 13—Silurian granodiorite; 14—Silurian dacite; 15—17—Cambrian Delisitan ophiolite; 15—Basalt; 16—Gabbro; 17—Serpentinite; 18—Geological boundary; 19—Thrust fault; 20—Nappe fault; 21—Bedding and attitude; 22—Sampling location

带向西的延伸。

阿尼玛卿—布青山构造带为构造混杂岩带,基岩为二叠纪马尔争组,上覆有上二叠统格曲组,其中马尔争组是一套复理石沉积,是粗粒长石石英砂岩、中粒杂砂岩、含砾砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩、泥质板岩等岩石类型的组合;格曲组为磨拉石沉积,岩性主要为砾岩,砾石成分主要为燧石、花岗岩、石英岩、变质岩等。基质内混杂有零散分布的不同时代、不同岩性、不同来源的构造块体,主要包括:①元古宙变质基底岩系苦海杂岩岩块:位于得利斯蛇绿岩的北侧,主要由大理岩、石英片岩、云母片岩、斜长角闪片岩、片麻岩和变粒岩等组成;②早古生代及晚古生代蛇绿岩岩块:早古生代蛇绿岩位于布青山得利斯沟中北部,晚古生代蛇绿岩位于哈尔郭勒沟南侧,刘战庆等<sup>[7]</sup>获得两处蛇绿岩中辉长岩的锆石U-Pb年龄分别为(516±6.3)Ma和(332.8±3.1)Ma;③晚古生代基性火山岩岩块:分布于得利斯、哈尔郭勒和哥日卓托等,岩性为玄武岩,玄武岩与灰岩共生,具有海山结构,刘战庆<sup>[23]</sup>研究认为得利斯沟的海山玄武岩具有N-MORB的特征;④早古生代中酸性侵入岩块、中酸性火山岩岩块:中酸性侵入岩块以白日切特花岗闪长岩为代表,锆石U-Pb年龄为(441±6)Ma<sup>[22]</sup>,中酸性火山岩块出露于白日切特地区,形成时代为(438±3)Ma<sup>[22]</sup>。该带还被三叠纪中酸性侵入岩体侵入,并发育有由石炭—二叠系树维门科组灰岩组成的大型推覆体。

## 2 玄武岩地质特征

布青山哈尔郭勒海山玄武岩岩块主要出露于布青山地区的哈尔郭勒沟南侧,平面上多呈透镜状、长条状呈近东西向展布,玄武岩岩块基本都被断层切断成大小不一的块体,单个块体的延伸长度最小不足1 km,最大达5 km以上(图1)。地貌特征鲜明,多形成高峻突出的高山。玄武岩与周围混杂岩基质多呈断层接触关系。

出露于布青山地区的哈尔郭勒玄武岩具有特殊现象,即在玄武岩之上发育有一套灰岩,局部地区甚至还有灰岩建造之上又覆盖了一层玄武质熔岩的现象。这种玄武岩基座+灰岩盖层的二元结构,与王永标<sup>[23]</sup>在研究巴颜喀拉及其邻区的古海山时所建立的枕状熔岩—碳酸盐岩顶盖海山模式相

似。布青山古海山模式为:枕状玄武岩+玄武质熔岩角砾岩+灰岩(部分为生物礁灰岩)+玄武岩(图2)。枕状玄武岩的枕状构造证明该玄武岩是水下喷发。枕状玄武岩顶部发育有玄武质熔岩角砾岩,玄武质熔岩角砾岩显然是火山喷发的产物。灰岩之上又发育有玄武岩的现象,说明在灰岩形成之后玄武岩的再次喷发,也就是说该地区可能经历了两次玄武岩喷发。

## 3 岩石组合与岩石学特征

布青山地区哈尔郭勒沟南侧出露的玄武岩主要为浅灰绿色—灰绿色枕状玄武岩、浅灰绿色—灰绿色块状玄武岩(图3-a),此外还有少量浅灰绿色—灰绿色玄武质熔岩角砾岩和紫红—肝红色块状玄武岩(图3-b)。浅灰绿色—灰绿色枕状玄武岩具致密隐晶质结构,岩枕直径多为40~90 cm,基本都为浅灰绿色—灰绿色,外壳具冷凝边,可见熔岩在海水中淬火冷却时形成的矿物骸晶。在角砾状玄武岩和块状玄武岩中节理发育,并多被方解石细脉和少量石英细脉充填。玄武岩中灰白色碳酸岩脉,呈微晶结构,块状构造。

浅灰绿色—灰绿色块状玄武岩具有斑状结构,基质为填间结构,发育杏仁构造。斑晶为斜长石(图3-c),斑晶含量较低,约为2%,斜长石颗粒大小1.3 mm左右,斜长石呈板柱状零散分布,斜长石双晶发育。基质中斜长石颗粒大小0.2~0.3 mm,含量约

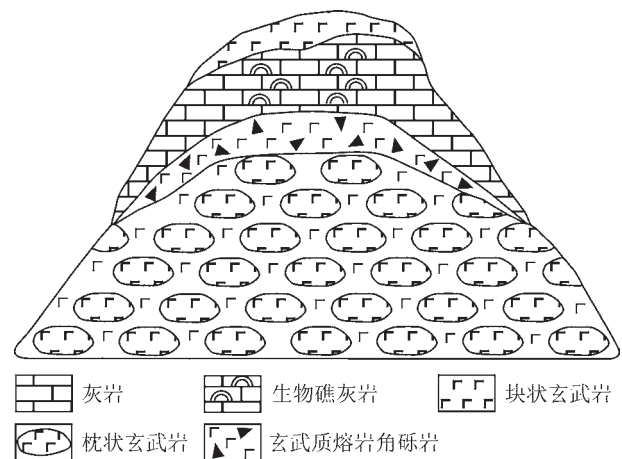


图2 布青山地区哈尔郭勒海山结构模式图(据文献[23]修改)  
Fig.2 Structural model of the seamount in Haerguole of Buqingshan area (modified after [23])



60%,斜长石杂乱分布(图3-d),在斜长石的间隙中分布玄武质火山玻璃、次生蚀变的绿泥石、绿帘石,辉石、磁铁矿等。岩石发生强蚀变,斜长石主要发生钠黝帘石化、透闪石化,少量蚀变为高岭土、绢云母。

紫红-肝红色块状玄武岩具填间结构,杏仁状构造。岩石中斜长石含量相对较高,约为60%,斜长石颗粒大小一般0.2~0.3 mm(长轴),斜长石呈长

柱状杂乱分布,在斜长石杂乱分布所形成的间隙中分布着玄武质玻璃和绿泥石、绿帘石。岩石中偶见辉石斑晶(图3-e),辉石斑晶粒度0.2 mm左右。杏仁状构造也发育,杏仁体较少1%左右,杏仁体呈长条状、椭圆状(图3-f)及不规则状,大小一般0.8~1.8 mm,杏仁体成分主要为方解石。岩石发生强蚀变,斜长石主要发生钠黝帘石化、透闪石化等。

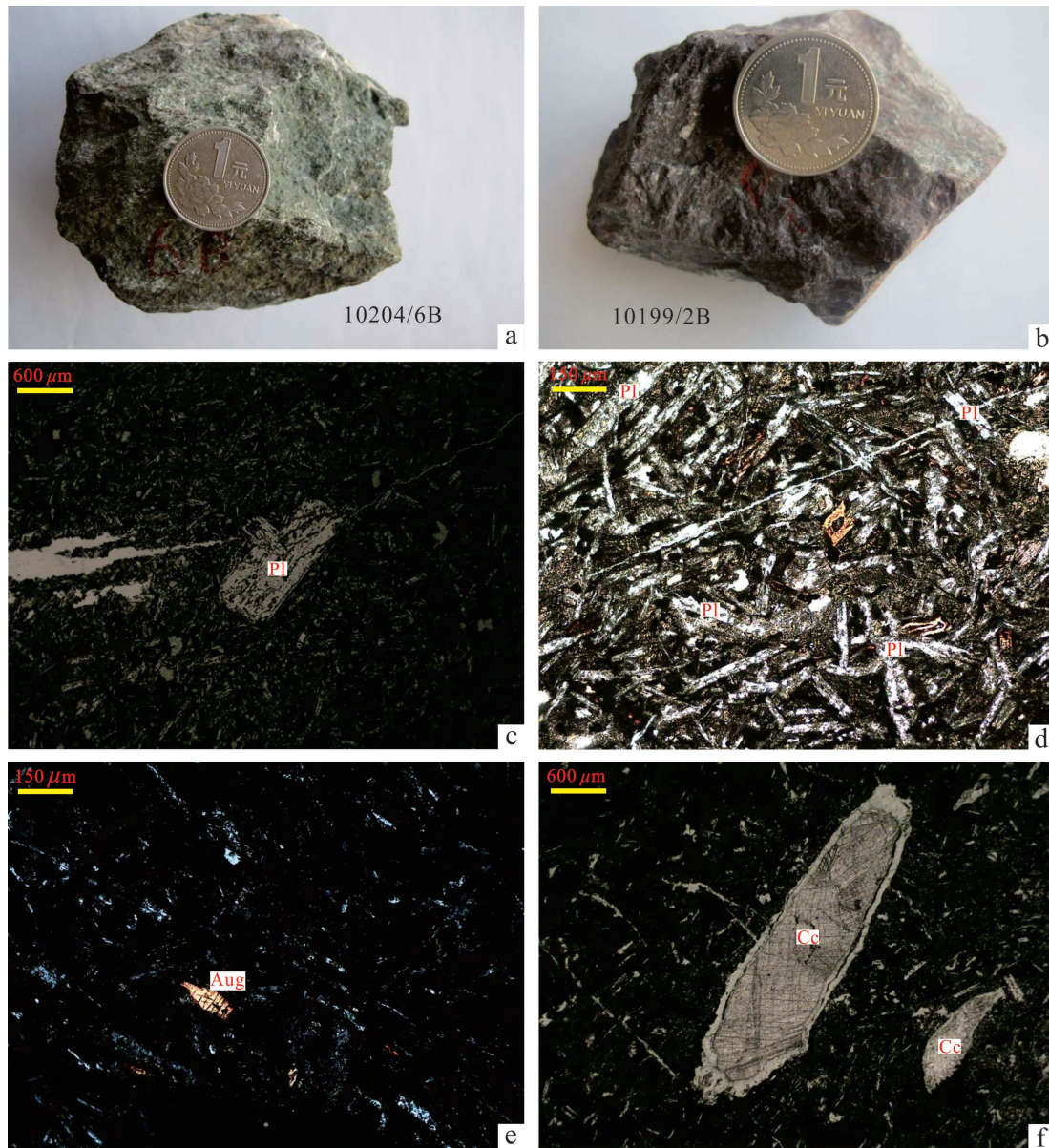


图3 哈尔郭勒玄武岩手标本照片和镜下显微照片(正交偏光)

a—灰绿色块状玄武岩手标本照片;b—肝红色块状玄武岩手标本照片;c—灰绿色玄武岩中的斜长石斑晶;d—灰绿色玄武岩的填间结构;e—肝红色玄武岩中的辉石斑晶;f—肝红色玄武岩中的杏仁体;Pl—斜长石;Aug—辉石;Cc—方解石

Fig.3 Photograph and micrograph of Haerguole basalts (crossed nicols)

a—Hand specimen photograph of grayish green massive basalt; b—Hand specimen photograph of liver red massive basalt; c—Plagioclase phenocryst of grayish green basalt; d—Intersertal structure of grayish green basalt; e—Pyroxene phenocryst of liver red basalt; f—Amygdala of liver red basalt; Pl—Plagioclase; Aug—Augite; Cc—Calcite

## 4 岩石地球化学特征

### 4.1 主量元素

布青山地区哈尔郭勒沟南侧出露的海山玄武岩主量元素分析结果见表1。岩石的烧失量普遍较大(LOI=2.90%~13.01%,平均值为7.37%,表中未列出),与岩石普遍发生绿泥石、透闪石化等含水蚀变以及风化作用密切相关。Pearce提出的 $Zr/TiO_2 \times 10^{-4}$ -

$10^{-4}$ -Nb/Y图解被认为是划分蚀变、变质火山岩系列的有效图解<sup>[28]</sup>。由图4-a可以看出,所分析8个样品中,有4个样品(10199/1、10199/2、10199/3、10199/4)落入碱性玄武岩区域,另外4个样品(10203/5、10204/6、10205/7、10205/8)落入亚碱性玄武岩区域。在AFM图解(图4-b)上,亚碱性玄武岩总体为拉斑玄武岩系列。

碱性玄武岩的 $SiO_2$ 含量变化范围为44.39%~

表1 哈尔郭勒玄武岩主量元素(%)分析结果  
Table 1 Major element components (%) of Haerguole basalts

分析项目	10199/1	10199/2	10199/3	10199/4	10203/5	10204/6	10205/7	10205/8
	紫红-肝红色 块状构造	紫红-肝红色 块状构造	紫红-肝红色 块状构造	灰绿-浅绿色 块状构造	灰绿-浅绿色 块状构造	灰绿-浅绿色 块状构造	灰绿-浅绿色 块状构造	灰绿-浅绿色 块状构造
SiO <sub>2</sub>	44.39	48.27	48.99	46.64	49.77	47.36	51.36	49.34
TiO <sub>2</sub>	2.41	2.33	2.30	1.63	1.24	0.71	1.02	1.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.00	14.33	15.56	15.76	14.98	17.86	15.93	15.65
MnO	0.23	0.23	0.19	0.15	0.17	0.12	0.14	0.17
MgO	2.87	3.65	3.77	8.35	7.28	11.44	11.17	10.19
CaO	12.45	12.09	7.40	11.45	12.50	8.96	3.83	5.93
Na <sub>2</sub> O	4.84	4.69	3.77	1.90	3.56	1.64	3.44	3.47
K <sub>2</sub> O	1.11	0.73	1.72	0.38	0.13	2.84	0.10	0.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.89	0.85	0.32	0.22	0.10	0.05	0.07	0.12
FeO	9.67	7.78	9.65	9.19	6.56	5.69	8.20	8.64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.14	5.05	6.33	4.32	3.70	3.32	4.74	4.80
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
N <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	5.95	5.43	5.49	2.28	3.70	4.48	3.53	3.53
Mg#	34.62	45.49	41.01	61.82	66.41	78.17	70.80	67.75

注:分析由中国科学院地质与地球物理研究所完成,除FeO和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,其他元素用XRF法分析,分析精度优于2%;由于原始数据烧失量较大,表中数据已进行了相应的校正。

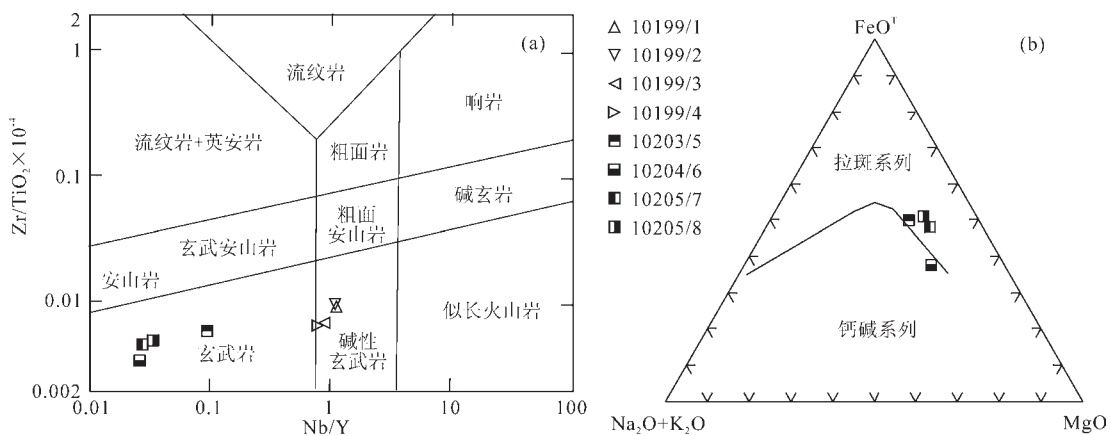


图4 哈尔郭勒玄武岩 $Zr/TiO_2 \times 10^{-4}$ -Nb/Y(a)和AFM(b)图解  
(图a据文献[28];图b据文献[29])

Fig.4 Plots of  $Zr/TiO_2 \times 10^{-4}$ -Nb/Y(a) and AFM(b) for Haerguole basalts (Fig.a after [28]; Fig.b after [29])



48.99%, 平均为 47.07%, 在基性岩范围内。TiO<sub>2</sub> 含量为 1.63%~2.41%, 平均值为 2.17%, 与加拿大 Flin Flon Belt (Amisk collage) 1.9 Ga 的洋岛玄武岩的 TiO<sub>2</sub> 含量 (1.9%)<sup>[30]</sup> 接近。MgO 含量为 2.87%~8.35%, 变化范围较大, 平均为 4.66%。4 个样品均为 Na<sub>2</sub>O>K<sub>2</sub>O, 除样品 10199/4 外, 其他 3 个样品的 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)>5%, 表现出富碱的特征。FeO 含量为 7.78%~9.67%, 平均为 9.07%。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量变化范围为 4.32%~6.33%, 平均为 5.46%。Mg# 值 (Mg#=100×MgO/(MgO+FeO), 摩尔比) 变化范围为 34.62~61.82, 平均为 45.74, 说明岩浆发生一定程度的分离结晶。

亚碱性玄武岩的 SiO<sub>2</sub> 含量变化范围为 49.34%~51.36%, 平均为 49.46%。TiO<sub>2</sub> 含量变化范围 0.71%~1.62%, 平均值为 1.15%, 比加拿大 Flin Flon Belt (Amisk collage) 的 1.9 Ga 的 N-MORB 的 TiO<sub>2</sub> 含量 (1.07)<sup>[30]</sup> 略高, 较碱性玄武岩明显偏低。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高为 14.98%~17.86%, 平均为 16.11%, 与现代大洋的洋中脊拉斑玄武岩 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 (大西洋、太平洋、印度洋玄武岩 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量分别为 15.6%、14.86% 和 15.15%)<sup>[31]</sup> 相当。MgO 含量较高为 7.28%~11.44%, 平均为 10.02%。4 个样品中有 3 个样品的 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)<4%, 表现出贫碱的特征。FeO 含量较高为 5.69%~8.64%, 平均为 7.27%。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 3.32%~4.80%, 平均为 4.14%。Mg# 值 (Mg#=100×MgO/(MgO+FeO), 摩尔比) 变化范围为 66.41~78.17, 平均为 70.78, 说明岩浆的分离结晶程度较低。

## 4.2 微量元素

布青山地区哈尔郭勒沟南侧出露的海山玄武岩稀土元素和微量元素分析结果 (表 2) 显示: 碱性玄武岩 (样品 10199/1、10199/2、10199/3、10199/4) 和亚碱性玄武岩 (样品 10203/5、10204/6、10205/7、10205/8) 的稀土元素和微量元素含量特征明显不同。

碱性玄武岩的稀土总量较高, 变化较大,  $\Sigma$ REE 变化范围为  $78.26 \times 10^{-6}$ ~ $203.92 \times 10^{-6}$ , 平均为  $148.56 \times 10^{-6}$ , 其中  $\Sigma$ LREE 为  $63.8 \times 10^{-6}$ ~ $175.36 \times 10^{-6}$ , 平均为  $125.41 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma$ HREE 为  $14.46 \times 10^{-6}$ ~ $28.56 \times 10^{-6}$ , 平均为  $23.15 \times 10^{-6}$ , 轻重稀土分异明显 ( $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE=4.41~6.14, 平均为 5.25), 轻稀土较重稀土明显富集。(La/Yb)<sub>N</sub>=4.14~6.71, 平均值为 5.35; (Ce/Yb)<sub>N</sub>=3.31~5.12, 平均为 4.16;  $\delta$ Eu=1.03~1.17, 平均

值为 1.10, Eu 具有不明显的正异常。球粒陨石标准化配分曲线呈轻稀土富集, 分馏较明显, 而重稀土相对亏损, 分馏不明显的右倾型曲线特征 (图 5-a), 与中国三江地区洋岛型玄武岩<sup>[32]</sup> 及夏威夷碱性玄武岩<sup>[33-34]</sup> 的稀土配分形式相似。微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 5b) 显示, 该碱性玄武岩的不相容元素具有以下特点: 曲线总体显示为右倾负斜率富集型配分型式, 除 Cs、Rb、Ba、K、Sr 等活性较强的大离子亲石元素变化较大外, 其他元素自左向右, 随元素不相容性的降低, 富集度逐渐降低。从曲线中可以看出没有 Nb、Ta 的亏损现象, Ti 具有弱的亏损, 这也是典型洋岛玄武岩的微量元素地球化学特征。

亚碱性玄武岩的稀土总量低, 变化不大 ( $\Sigma$ REE=  $23.63 \times 10^{-6}$ ~ $55.36 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $39.88 \times 10^{-6}$ ), 轻、重稀土元素分异不明显 ( $\Sigma$ LREE=  $11.07 \times 10^{-6}$ ~ $29.95 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $21.64 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma$ HREE=  $12.56 \times 10^{-6}$ ~ $25.41 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $18.24 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE= 0.88~1.54, 平均值为 1.15)。(La/Yb)<sub>N</sub>=0.29~0.74, 平均值为 0.45 < 1, 属于标准洋中脊 (La/Yb)<sub>N</sub>=0.35~1.1 的范围; (Ce/Yb)<sub>N</sub>=0.37~0.77, 平均为 0.52 < 1。 $\delta$ Eu=1.02~1.22, 平均值为 1.15, 具不明显的正异常。球粒陨石标准化配分曲线呈轻稀土相对亏损, 而重稀土相对富集, 分馏不明显的左倾型曲线特征 (图 5-a), 具有 N-MORB 稀土地球化学特征。微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 5-b) 显示大离子亲石元素具有强烈的分异的特征, Cs、Rb、Ba、Th、U、K 等大离子亲石元素变化较大, 这可能与海相玄武岩形成时遭受海水热液蚀变及后期绿泥石、透闪石蚀变有关。高场强元素整体上含量变化不大, 但 Nb、Ta、Ti、P 略具亏损。

综合以上地球化学特征, 可以把哈尔郭勒海山玄武岩分为碱性玄武岩和亚碱性玄武岩, 其中碱性玄武岩具有洋岛玄武岩的地球化学特征, 即属于洋岛玄武岩 (OIB); 亚碱性玄武岩具有正常大洋中脊玄武岩的地球化学特征, 即属于正常洋中脊玄武岩 (N-MORB)。

## 5 讨 论

### 5.1 形成时代

中下二叠统马尔争组是布青山构造混杂岩带的基质, 布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩与其上覆

表2 哈尔郭勒玄武岩微量元素( $10^{-6}$ )分析结果  
 Table 2 Trace elements abundances( $10^{-6}$ ) of Haerguole basalts

分析项目	10199/1	10199/2	10199/3	10199/4	10203/5	10204/6	10205/7	10205/8
Rb	17.70	12.30	42.30	8.93	2.71	22.60	1.14	0.86
Sr	215.00	216.00	421.00	242.00	119.00	279.00	85.10	82.20
Y	37.30	39.20	30.60	20.30	29.90	21.20	24.80	40.40
Zr	232.00	233.00	164.00	109.00	75.70	25.00	48.90	84.30
Nb	41.40	42.10	26.60	15.50	2.76	0.54	0.68	1.34
Cs	2.16	2.06	2.62	3.04	0.29	2.60	0.65	1.41
Ba	166.00	126.00	163.00	500.00	24.10	86.00	18.00	16.10
La	32.40	38.20	21.80	12.90	3.70	1.05	1.41	3.06
Ce	67.30	75.10	43.00	26.90	10.00	3.43	4.76	9.71
Pr	8.77	9.50	5.49	3.44	1.69	0.62	0.94	1.70
Nd	39.80	40.80	24.80	15.50	9.67	3.71	5.61	10.40
Sm	8.36	8.78	5.72	3.64	3.26	1.53	2.12	3.67
Eu	2.81	2.98	2.24	1.42	1.38	0.73	0.98	1.41
Gd	8.13	8.33	5.87	3.85	4.05	2.21	2.89	4.87
Tb	1.37	1.45	1.03	0.72	0.85	0.53	0.67	1.10
Dy	7.91	8.16	6.24	4.18	5.47	3.56	4.42	7.32
Ho	1.45	1.49	1.17	0.76	1.14	0.74	0.91	1.49
Er	4.00	4.10	3.40	2.20	3.43	2.36	2.94	4.49
Tm	0.65	0.63	0.51	0.34	0.55	0.38	0.47	0.71
Yb	3.59	3.84	3.30	2.10	3.36	2.40	2.93	4.72
Lu	0.52	0.56	0.45	0.31	0.50	0.37	0.43	0.70
Hf	5.73	5.78	4.10	2.76	2.42	0.83	1.48	2.44
Ta	2.58	2.59	1.63	0.96	0.18	0.04	0.05	0.10
Pb	3.59	3.51	3.16	1.71	1.14	0.86	0.99	1.05
Th	2.99	3.22	2.29	1.29	0.28	0.05	0.08	0.21
U	0.72	0.92	0.41	0.64	0.08	0.14	0.11	0.05
$\Sigma$ REE	187.06	203.92	125.01	78.26	49.05	23.63	31.47	55.36
$\Sigma$ LREE	159.44	175.36	103.05	63.80	29.70	11.07	15.82	29.95
$\Sigma$ HREE	27.62	28.56	21.96	14.46	19.35	12.56	15.65	25.41
$\Sigma$ L/ $\Sigma$ H	5.77	6.14	4.69	4.41	1.54	0.88	1.01	1.18
$\delta$ Eu	1.03	1.05	1.17	1.15	1.16	1.21	1.22	1.02
(La/Yb) <sub>N</sub>	6.08	6.71	4.45	4.14	0.74	0.29	0.32	0.44
(Ce/Yb) <sub>N</sub>	4.85	5.12	3.37	3.31	0.77	0.37	0.42	0.53
(Sm/La) <sub>N</sub>	0.41	0.37	0.42	0.45	1.40	2.32	2.39	1.91

注:分析由中国科学院地质与地球物理研究所用ICP-MS法完成; $\Sigma$ L/ $\Sigma$ H= $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE。

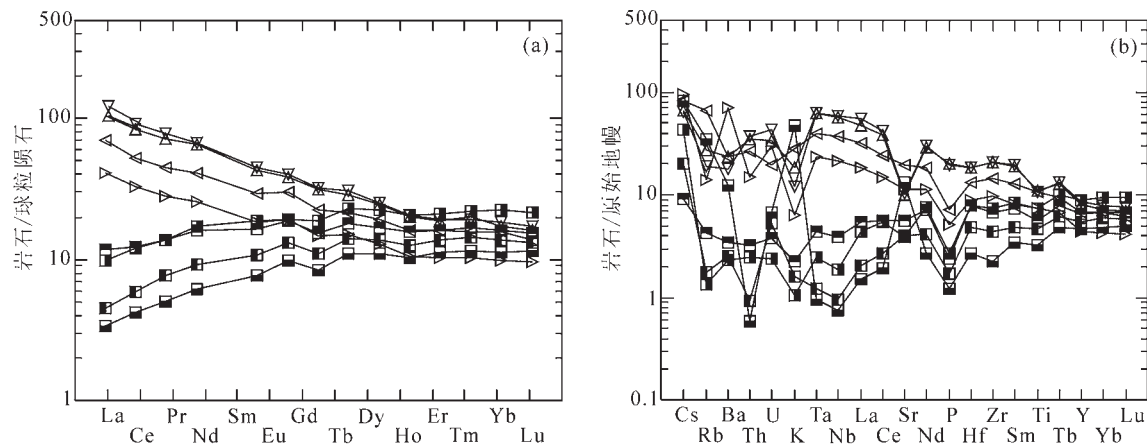


图5 哈尔郭勒玄武岩球粒陨石标准化REE配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)  
(球粒陨石标准化数据据文献[35];原始地幔标准化数据据文献[36];图例同图4)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergram (b) of Haerguole basalts

(chondrite-normalized data after [35]; primitive mantle-normalized data after [36]; legends as for Fig.4)

灰岩呈透镜体状岩块产于马尔争组中,海山玄武岩的形成时代应该早于马尔争组或与马尔争组沉积时代相同。与玄武岩伴生的灰岩覆盖于玄武岩之上,玄武岩的形成时代应该不晚于上覆灰岩的时代。冀六祥等<sup>[37]</sup>根据在长石头山、花石峡等地所获孢粉化石,认为布青山群形成于早三叠世;中国地质大学(武汉)地质调查研究院完成的冬给措纳湖幅1:25万区域地质调查<sup>[38]</sup>在得力斯坦沟南与玄武岩伴生的细晶灰岩中获得 *Popanoceras* sp., *Kargalites* sp. 菊石动物化石,时代为早二叠世,所以布青山哈尔郭勒海山玄武岩的形成时代为早二叠世或更早。边千韬等<sup>[5]</sup>在布青山得力斯坦沟枕状玄武岩中获得的 Rb-Sr 等时线年龄 ( $340.3 \pm 11.6$ ) Ma 和普通 Pb 等时线年龄 ( $310 \pm 150$ ) Ma, 为早石炭世—晚石炭世早期。刘战庆等<sup>[7]</sup>获得布青山地区哈尔郭勒蛇绿岩中辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 ( $332.8 \pm 3.1$ ) Ma, 为早石炭世。根据以上资料推测布青山哈尔郭勒海山玄武岩的形成时代可能为早石炭世—早二叠世,且形成于石炭纪的可能性更大。

## 5.2 构造环境

地球化学特征是判别火成岩形成环境的重要标志之一。对于发生蚀变或弱变质作用的火山岩,使用在蚀变和变质作用过程中受影响较小、稳定性好的 Zr、Hf、Nb、Ta、Y 等高场强元素进行构造环境判别是比较有效的。

在 Nb-Zr-Y 三角图解(图 6-a)中,有 4 个样品

(10199/1、10199/2、10199/3、10199/4)落入板内玄武岩区域,另外 4 个样品(10203/5、10204/6、10205/7、10205/8)基本都落入 D 区,即正常洋中脊玄武岩(N-MORB)区内。在 Hf-Th-Nb 三角图解(6-b)中,碱性玄武岩样品也主要落在板内玄武岩区,亚碱性玄武岩样品点落入正常洋中脊玄武岩(N-MORB)区和岛弧玄武岩之间。在 Ti-Zr-Y 三角图解(图 7-a)中,碱性玄武岩样品基本都落在板内玄武岩区域,亚碱性玄武岩样品落入洋脊玄武岩和岛弧拉斑玄武岩区。在 La-La/Nb 图解(图 7-b)中,碱性玄武岩样品都落在洋岛玄武岩(OIB)区域,亚碱性玄武岩样品落在洋脊玄武岩(MORB)及洋脊玄武岩与岛弧玄武岩(IAB)的重叠区域内。通过以上图解可以初步确定布青山地区哈尔郭勒玄武岩中的碱性玄武岩形成于洋岛或海山环境,亚碱性玄武岩形成于洋中脊环境,亚碱性玄武岩可能因为源区有陆源沉积物或分离结晶作用的影响致使部分样品点投到岛弧区。

Dilek<sup>[43]</sup>在最新的蛇绿岩分类方案中根据蛇绿岩的生成环境将蛇绿岩分为与俯冲作用无关的蛇绿岩和与俯冲作用有关的蛇绿岩两大类型,与俯冲作用无关的蛇绿岩包括洋脊型、地幔柱型和陆缘型 3 类。刘战庆<sup>[25]</sup>对布青山地区哈尔郭勒蛇绿岩进行地球化学研究认为哈尔郭勒蛇绿岩是洋脊型蛇绿岩,这可能说明现今的布青山地区哈尔郭勒蛇绿岩与玄武岩位于曾经的洋脊扩张位置。刘战庆等<sup>[7]</sup>获



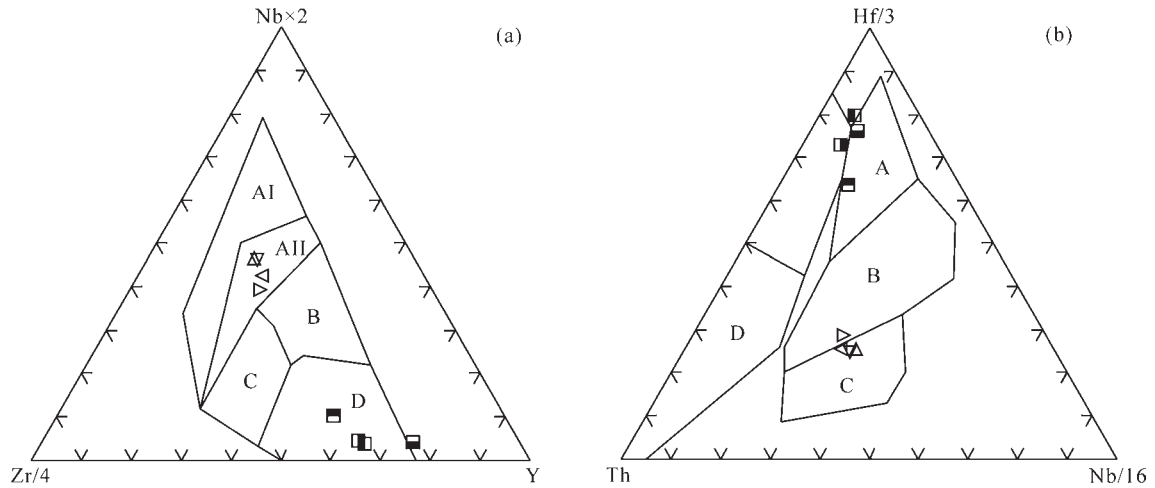


图6 哈尔郭勒玄武岩 Nb-Zr-Y 图解(a)和 Hf-Th-Nb 图解(b)

(图a据文献[39];图b据文献[40];图例同图4)

a图: A I + A II—板内碱性玄武岩; A II + C—板内拉斑玄武岩; B—P型 MORB; D—N型 MORB; C+D—岛弧玄武岩;  
b图: A—N型 MORB; B—E型 MORB 和板内拉斑玄武岩; C—板内碱性玄武岩; D—岛弧玄武岩

Fig.6 Plots of Nb-Zr-Y (a) and Hf-Th-Nb (b) for Haerguole basalts  
(Fig. a after [39]; Fig. b after [40]; legends as for Fig. 4)

Fig.a: A I + A II -WPA; A II + C-WPT; B-P-MORB; D-N-MORB; C+D-IAB;  
Fig.b: A-N-MORB; B-E-MORB and WPT; C-WPA; D-IAB

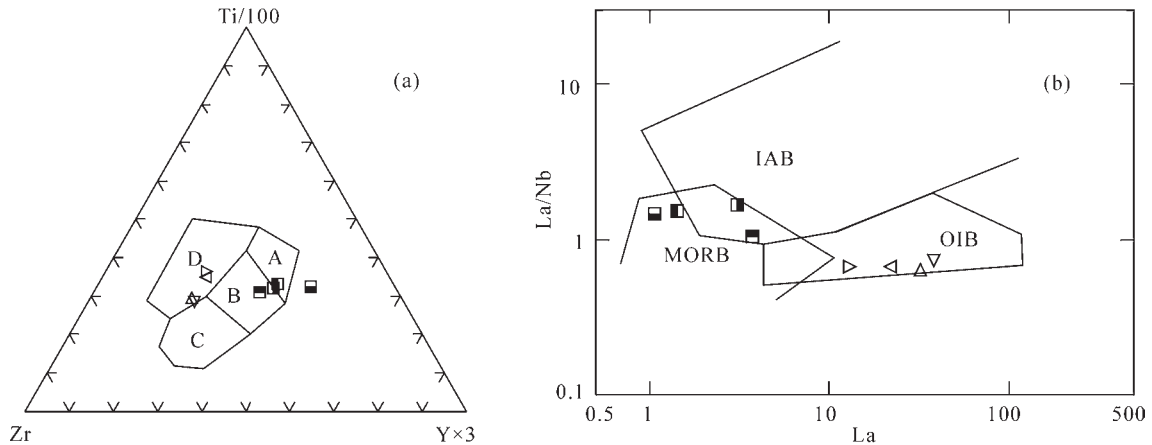


图7 哈尔郭勒玄武岩 Ti-Zr-Y 图解(a)和 La-La/Nb 图解(b)

(a底图据文献[41];b底图据文献[42];图例同图4)

a图: B—洋脊玄武岩; A+B—岛弧拉斑玄武岩; B+C—岛弧钙碱性玄武岩; D—板内玄武岩; b图: MORB—洋脊玄武岩;  
IAB—岛弧玄武岩; OIB—洋岛玄武岩

Fig.7 Plots of Ti-Zr-Y (a) and La-La/Nb (b) for Haerguole basalts  
(base map of Fig.a after [41]; base map of Fig.b after [42]; legends as for Fig.4)

Fig.a: B-N-MORB; A+B-IAT; B+C-CAB; D-WPB

得布青山地区哈尔郭勒蛇绿岩中辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为(332.8±3.1)Ma,为早石炭世,说明在早石炭世时布青山地区已经发育有洋盆,即阿尼玛卿—布青山洋。边千韬等<sup>[5,44]</sup>认为阿尼玛卿蛇绿岩带存在有早古生代和早石炭世—早二叠世两期蛇绿岩,

其中早石炭世—早二叠世蛇绿岩中的玄武岩、辉长岩等具有 N-MORB 型地球化学特征。王永标等<sup>[17]</sup>在花石峡至长石头山之间的青康公路两侧发现了早二叠世放射虫硅质岩,认为该放射虫硅质岩应该形成于深水盆地环境,这一地区在早二叠世已存在

阿尼玛卿洋。从以上资料可以看出早石炭世—早二叠世是阿尼玛卿—布青山洋的主要发育时期,这一阶段阿尼玛卿—布青山洋应该属于扩张阶段。根据布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩与马尔争组以及上覆灰岩之间的关系,推测布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩形成于早石炭世—早二叠世之间,即布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩的形成与阿尼玛卿—布青山洋的扩张有关。

尽管在布青山地区哈尔郭勒和得力斯坦出露有蛇绿岩,但布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩在空间上与上覆灰岩密切伴生,周围未见与其有共生关系的蛇纹岩、辉长岩等镁铁质—超镁铁质岩石,因此该套玄武岩不是蛇绿岩的组成部分。布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩具有枕状构造,这显然是水下喷发的特征,同时布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩普遍发生绿泥石化、绿帘石化,这可能是玄武岩喷发时遇到海水发生蚀变造成的。在布青山地区得力斯坦局部可见到玄武岩之上覆盖有形成于深海环境的紫红色钙质泥岩,该套泥岩应该是玄武岩位于洋底较深部位时沉积形成的。

综合以上地球化学和地质方面的资料,笔者认为布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩中的N-MORB形成于洋脊环境,OIB形成于洋脊附近的海山或者洋岛环境。

### 5.3 岩石成因

玄武质岩浆可以来源于地幔热柱、软流圈或岩石圈地幔,因为来源的多样性导致了玄武岩复杂多变的地球化学性质。尽管在OIB岩浆中微量元素的丰度和比值变化较大,但是它们还是有一定特

征,即富集不相容微量元素。布青山地区哈尔郭勒洋岛型玄武岩的微量元素特征表明它们来源于富集地幔源区,明显不同于来源于亏损地幔源区的MORB。强不相容元素比值对判别玄武岩的源区特征是十分有效的<sup>[45-46]</sup>。表3列出了布青山地区哈尔郭勒OIB型玄武岩和N-MORB型玄武岩的不相容元素比值的平均值,并与不同源区不相容元素比值<sup>[47]</sup>进行了比较。从表中可以看出,布青山地区哈尔郭勒OIB型玄武岩大多数比值与富集地幔源区(EM II)接近,因此推测布青山地区哈尔郭勒洋岛型玄武岩的源区可能是EM II型富集地幔。布青山地区哈尔郭勒N-MORB型玄武岩的比值与N-MORB源区相比普遍偏高。

Nb/Yb、Ta/Yb、La/Yb等微量元素比值可以有效区分地幔源区,并且可以对岩浆演化过程中受流体或地壳混染的程度进行判断,本文采用Nb/Yb-Ta/Yb和Nb/Yb-La/Yb图解,没有受后期过程影响的元素应该投在地幔序列中<sup>[48,49]</sup>。在Nb/Yb-Ta/Yb图解(图8-a)和Nb/Yb-La/Yb图解(图8-b)中,布青山地区哈尔郭勒OIB型玄武岩的数据点都落在地幔序列中,且落在E-MORB和OIB型地幔序列之间,但更靠近OIB,这说明布青山地区哈尔郭勒OIB型玄武岩起源于具有OIB性质的富集地幔,Nb、Yb、Ta、La等微量元素基本没有受流体或地壳混染的影响;布青山地区哈尔郭勒N-MORB型玄武岩的数据点位于地幔序列的边缘,但整体靠近N-MORB地幔序列,这说明布青山地区哈尔郭勒N-MORB型玄武岩起源于具有N-MORB性质的地幔源区,但Nb、Yb、Ta、La等微量元素受后期过程的影响较大。布

表3 哈尔郭勒玄武岩微量元素与地幔端元组分的差异

比值	本区 OIB	本区 N-MORB	原始地幔	N-MORB	陆壳	HIMU	EM I	EM II
Zr/Nb	6.08	52.30	14.80	30.00	16.20	4.10	7.05	6.10
La/Nb	0.83	1.92	0.94	1.07	2.20	0.72	0.99	0.98
Ba/Nb	11.35	51.95	9.00	4.30	54.00	5.60	14.73	9.73
Ba/Th	133.36	526.93	77.00	68.00	124.00	64.20	127.67	74.00
Rb/Nb	0.72	11.37	0.91	0.36	4.70	0.37	1.01	0.73
Th/Nb	0.08	0.12	0.12	0.07	0.44	0.09	0.11	0.13
Th/La	0.09	0.06	0.13	0.07	0.20	0.12	0.12	0.14
Ba/La	13.67	26.61	9.60	4.00	25.00	7.82	15.03	10.00

注:各参数值据文献[47]。

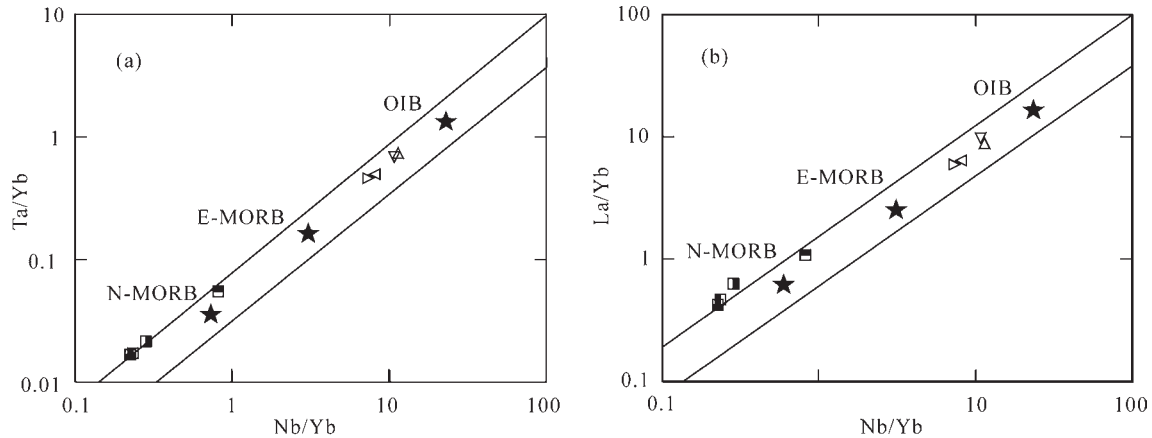


图8 哈尔郭勒玄武岩Nb/Yb-Ta/Yb图解(a)和Nb/Yb-La/Yb图解(b)(底图据文献[48],图例同图4)  
Fig.8 Plots of Nb/Yb-Ta/Yb (a) and Nb/Yb-La/Yb (b) for Haerguole basalts(base map after [48], legends as for Fig.4)

青山地区哈尔郭勒N-MORB型玄武岩除了样品10203/5,其他3个样品的Nb和Ta都发生轻微的亏损,导致Nb和Ta亏损的原因可能有两个,一是俯冲的陆源沉积物通过地幔对流和壳幔循环加入到N-MORB源区,陆源沉积物导致N-MORB源区的Nb和Ta含量相对降低;二是岩浆通过岩石圈地幔时可能发生角闪石±金云母±石榴石矿物的分离结晶,这些矿物的分离结晶使熔体中的Nb和Ta减少<sup>[50,51]</sup>。

通过地球化学研究发现布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩是OIB与N-MORB的组合,但是在野外露头上二者并没有明显的构造界线或者岩性界线(在野外无法直接区分出OIB和N-MORB)。结合地球化学研究结果、采样位置以及玄武岩与灰岩的空间位置可以发现,布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩的OIB型玄武岩、N-MORB型玄武岩和与之伴生的灰岩的空间关系为:N-MORB型玄武岩在下部,OIB型玄武岩在上部,作为盖层的灰岩盖在OIB型玄武岩之上(图9)。布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩的这种空间关系说明N-MORB的形成时间要早于OIB。

侯增谦等<sup>[52]</sup>对前人研究<sup>[53]</sup>进行了总结认为热点式地幔柱有3种类型:板内热幔柱、洋脊中心热幔柱和近洋脊热幔柱,其中大洋板内热柱可以产生OIB,但是地幔热柱不会对洋中脊产物(如MORB)产生重要的化学影响。根据布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩是OIB与N-MORB的组合,且N-MORB位于下部,OIB位于上部的空间关系,推测该海山玄武岩是洋脊扩张和大洋板内热柱共同作用下的产物,

可能的成因模式为:在洋脊位置,亏损地幔熔融产生具有N-MORB性质的岩浆,熔体中可能有一些陆源沉积物的加入,岩浆上升并发生一定程度的分离结晶形成N-MORB,随着洋脊的不断扩张,早期形成的N-MORB逐渐远离洋脊中心并位于地幔热柱的上方。起源于富集地幔的地幔热柱垂直上升导致早期的N-MORB上隆减薄,地幔热柱携带具有OIB性质的岩浆继续上涌形成OIB并盖在早期形成的N-MORB之上,最终形成了具有N-MORB在下、OIB在上的“层序”的海山玄武岩。

#### 5.4 地质意义

蛇绿岩套是洋壳存在的证据,是判断一个地区

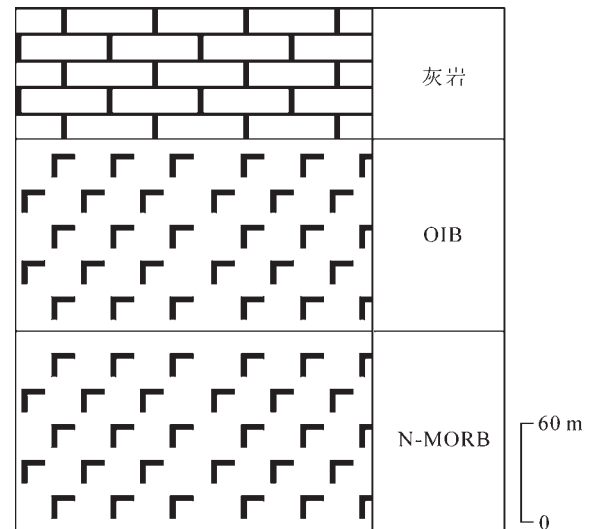


图9 布青山地区哈尔郭勒海山柱状图  
Fig.9 Geological columnar section of Haerguole seamount in Buqingshan area



出现过洋盆的标志。刘战庆等<sup>[7]</sup>获得布青山地区哈尔郭勒蛇绿岩中辉长岩的锆石U-Pb年龄为(332.8±3.1)Ma,陈亮等<sup>[9]</sup>获得阿尼玛卿地区德尔尼蛇绿岩中玄武岩的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar年龄约为340 Ma,均为早石炭世,也就是说早石炭世时阿尼玛卿—布青山地区已有洋盆存在,即阿尼玛卿—布青山洋。边千韬等<sup>[5,45]</sup>认为阿尼玛卿蛇绿岩带存在有早古生代和早石炭世—早二叠世两期蛇绿岩,两期蛇绿岩均形成于洋中脊环境,王永标等<sup>[17]</sup>根据在花石峡至长石头山之间的青康公路两侧发现的早二叠世放射虫硅质岩,认为这一地区在早二叠世已存在阿尼玛卿洋。上述资料表明,早石炭世—早二叠世阿尼玛卿—布青山地区一直有洋盆的发育。OIB的出现可以作为一个地区出现过洋盆的重要旁证<sup>[54]</sup>。本文研究的布青山地区哈尔郭勒海山玄武岩是OIB和MORB的共生组合,形成年龄应该为早石炭世—早二叠世,该海山玄武岩进一步证明布青山地区在晚古生代有洋盆存在。

阿尼玛卿洋曾是规模巨大的古特提斯洋的一部分,代表冈瓦纳大陆与欧亚大陆之间的连接部位<sup>[12,55]</sup>,阿尼玛卿—布青山洋代表了古特提斯洋最北缘的一条分支洋盆<sup>[56]</sup>。张国伟等<sup>[26,57]</sup>认为阿尼玛卿—布青山构造带属于整个勉略构造带向西的延伸,阿尼玛卿—布青山构造带和勉略构造带共同构成古特提斯构造域的北界,换言之阿尼玛卿—布青山洋和勉略洋都曾是古特提斯洋的组成部分。边千韬等<sup>[44]</sup>认为阿尼玛卿—布青山古特提斯洋在泥盆纪末—石炭纪初打开,是一个具有相当规模的成熟洋盆。本文研究的哈尔郭勒玄武岩是在阿尼玛卿—布青山洋的扩张背景下形成的。杨经绥等<sup>[12]</sup>、李瑞保等<sup>[58]</sup>认为阿尼玛卿—布青山古特提斯洋壳经过晚二叠世—早三叠世向北俯冲,在早三叠世末期闭合。中三叠世晚期—晚三叠世阿尼玛卿—布青山洋南北两侧的巴颜喀拉地块与东昆仑地块发生碰撞,该期碰撞造山作用形成了布青山构造混杂岩带,哈尔郭勒玄武岩就是在该期碰撞造山作用中以构造块体的形式保存在布青山构造混杂岩带中。

## 6 结 论

(1)布青山地区哈尔郭勒玄武岩与其上覆灰岩的共生组合具有海山特征。

(2)布青山地区哈尔郭勒玄武岩的地球化学特征显示,哈尔郭勒玄武岩是OIB与N-MORB的共生组合。

(3)哈尔郭勒玄武岩形成年代可能为早石炭世—早二叠世,OIB形成于洋脊附近的海山或洋岛环境,N-MORB形成于洋脊环境,是阿尼玛卿—布青山古特提斯洋扩张背景下的产物。

**致谢:**丁仁平高级工程师、郭俊锋副教授、张晓飞、王学良、魏方辉等硕士参加了野外工作,室内工作得到了吴树宽、胡楠等硕士的帮助,在此一并表示感谢!

## 参考文献(references):

- [1] 杨经绥,许志琴,马昌前,等. 复合造山作用和中国中央造山带的科学问题[J]. 中国地质, 2010, 37(1): 1-11.  
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Ma Changqian, et al. Compound orogeny and scientific problems concerning the Central Orogenic Belt of China[J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 1-11(in Chinese with English abstract).
- [2] 边千韬,尹磊明,孙淑芬,等. 东昆仑布青山蛇绿混杂岩中发现奥陶纪疑源类[J]. 中国科学(D辑), 2001, 46(2): 167-171.  
Bian Qiantao, Yin Leiming, Sun Shufen, et al. Discovery of Ordovician acritarch in Buqingshan area in the East Kunlun mountains[J]. *Science in China(D)*, 2001, 46(2): 167-171(in Chinese).
- [3] Molnar P, Burchfiel B C, Zhao Z Y, et al. Geology evolution of northern Tibet: Result of an expedition to Ulugh Muztagh[J]. *Science*, 1987, 235: 299-305.
- [4] Burchfiel B C, Molnar P, Zhao Z Y, et al. Geologic of the Ulugh Muztagh area, north Tibet[J]. *Earth and Planetary of Science Letters*, 1989, 94: 57-70.
- [5] 边千韬,罗小全,李红生,等. 阿尼玛卿山早古生代和早石炭—早二叠世蛇绿岩的发现[J]. 地质科学, 1999, 34(4): 523-524.  
Bian Qiantao, Luo Xiaquan, Li Hongsheng, et al. Discovery of early Paleozoic and C<sub>1</sub>-P<sub>1</sub> ophiolites in the A'nyemaqen, Qinghai Province, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1999, 34(4): 523-524(in Chinese with English abstract).
- [6] Bian Qiantao, Li Dhui, Pospelov, et al. Age, geochemistry and tectonic setting of Buqingshan ophiolites, North Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 577-596.
- [7] 刘战庆,裴先治,李瑞保,等. 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[J]. 地质学报, 2011, 85(2): 186-194.  
Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. 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[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(2): 186–194(in Chinese with English abstract).
- [8] 陈亮, 孙勇, 柳小明. 青海省德尔尼蛇绿岩的地球化学特征及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 2000, 16(1): 106–110.
- Chen Liang, Sun Yong, Liu Xiaoming. Geochemistry of Dorni ophiolite and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(1): 106–110(in Chinese with English abstract).
- [9] 陈亮, 孙勇, 裴先治, 等. 德尔尼蛇绿岩<sup>40</sup>Ar–<sup>39</sup>Ar年龄: 青藏最北端古特提斯洋盆存在和延展的证据[J]. *科学通报*, 2001, 46(5): 424–426.
- Chen Liang, Sun Yong, Pei Xianzhi, et al. The <sup>40</sup>Ar–<sup>39</sup>Ar ages of the Dur'ngoi ophiolites: Evidence of ancient Tethys ocean basin in north Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(5): 424–426(in Chinese).
- [10] 裴先治. 勉略–阿尼玛卿构造带的形成演化与动力学特征[D]. 西安: 西北大学博士学位论文, 2001, 1–155.
- Pei Xianzhi. Geological Evolution and Dynamics of the Mianlue–A'nyemaqen Tectonic Zone, Central China[D]. Xi'an: Ph. D. thesis at Northwestern University, 2001: 1–155(in Chinese with English abstract).
- [11] 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 等. 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[J]. *中国地质*, 2004, 31(3): 225–238.
- Yang Jingsui, Wang Xibin, Shi Rendeng, et al. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, North Qinghai–Tibet Plateau: a fragment of paleo–tethyan oceanic crust[J]. *Geology in China*, 2004, 31(3): 225–238(in Chinese with English abstract).
- [12] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系[J]. *岩石矿物学杂志*, 2005, 24(5): 369–380.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Haibing, et al. The paleo–Tethyan volcanism and plate tectonic regime in the A'nyemaqen region of East Kunlun, northern Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24(5): 369–380(in Chinese with English abstract).
- [13] 郭安林, 张国伟, 孙延贵, 等. 阿尼玛卿蛇绿岩带OIB和MORB的地球化学及空间分布特征: 玛积雪山古洋脊热点构造证据[J]. *中国科学(D辑)*, 2006, 36(7): 618–629.
- Guo Anlin, Zhang Guowei, Sun Yangui, et al. Geochemistry and distribution characteristics of OIB and MORB in A'nyemaqen Ophiolite belt: Evidence to Majixueshan paleo–oceanic–ridge hot–spot structure[J]. *Science in China(Series D)*, 2006, 36(7): 618–629(in Chinese).
- [14] Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, et al. Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, Northeast Tibet Plateau: Evidence for Paleo–Tethyan Suture in Northwest China[J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(2): 303–331.
- [15] 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 等. 昆仑开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1–217.
- Jiang Chunfa, Yang Jingsui, Feng Binggui, et al. Opening Closing Tectonics of Kunlun Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1–217(in Chinese with English abstract).
- [16] Yang Jingsui, Robinson P T, Jiang Chunfa, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 1996, 258: 215–231.
- [17] 王永标, 黄继春, 骆满生, 等. 海西印支早期东昆仑造山带南侧古海洋盆地的演化[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1997, 22(4): 369–372.
- Wang Yongbiao, Huang Jichun, Luo Mansheng, et al. Paleo–Ocean evolution of the southern East Kunlun orogenic belt during Hercy–Early Indosinian[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(4): 369–372(in Chinese with English abstract).
- [18] 王国灿, 张天平, 梁斌, 等. 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[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1999, 24(2): 130–133.
- Wang Guocan, Zhang Tianping, Liang Bin, et al. Composite ophiolitic melange 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"[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 1999, 24(2): 130–133(in Chinese with English abstract).
- [19] 边千韬, 罗小全, 陈海泓, 等. 阿尼玛卿蛇绿岩带花岗–英云闪长岩锆石U–Pb同位素定年及大地构造意义[J]. *地质科学*, 1999, 34(4): 420–426.
- Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Chen Haihong, et al. Zircon U–Pb age of granodiorite–tonalite in the A'nyemaqen ophiolitic belt and its tectonic significance [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(4): 420–426(in Chinese with English abstract).
- [20] 边千韬, Pospelov Igor I, 李惠民, 等. 青海省布青山早古生代末期埃达克岩的发现及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 925–934.
- Bian Qiantao, Pospelov Igor I, Li Huimin, et al. Discovery of the end–early paleozoic adakite in the Buqingshan area, Qinghai Province, and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5): 925–934(in Chinese with English abstract).
- [21] 李王晔, 李曙光, 郭安林, 等. 青海东昆仑构造带苦海辉长岩和德尔尼闪长岩的锆石SHRIMP U–Pb年龄及痕量元素地球化学——对“祁–柴–昆”晚新元古代–早奥陶世多岛洋南界的制约[J]. *中国科学(D)*, 2007, 37(增刊 I): 288–294.
- Li Wangye, Li Shuguang, Guo Anlin, et al. The Zircon SHRIMP U–Pb ages and trace elements geochemistry of Kuhai gabbro and Dur'ngoi diorite in eastern Kunlun tectonic belt of Qinghai Province: implications for south margin of archipelagic ocean in Late Neoproterozoic–Early Ordovician of "Qi–Chai–Kun" Orogenic System [J]. *Science in China(D)*, 2007, 50(Supp. I):

- 331-338(in Chinese).
- [22] 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等. 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[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1150-1167.  
Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Early Paleozoic intermediate-acid magmatic activity in Bairiqiete area along the Buqingshan tectonic melange belt on the southern margin of East Kunlun: Constraints from zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1150-1167(in Chinese with English abstract).
- [23] 王永标. 巴颜喀拉及邻区中二叠世古海山的结构与演化[J]. 中国科学(D辑), 2005, 35(12): 1140-1149.  
Wang Yongbiao. The structure and evolution of Mid-Permian paleo-seamount in the Bayan Har and adjacent areas[J]. *Science in China(Series D)*, 2005, 35(12): 1140-1149(in Chinese).
- [24] 李佐臣, 裴先治, 刘战庆, 等. 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[J]. 地质学报, 2013, 87(8): 1-15.  
Li Zuochen, Pei Xianzhi, Liu Zhanqing, et al. Geochronology and geochemistry of the Gerizhuotuo diorites from the Buqingshan tectonic melange belt in the southern margin of East Kunlun and their geologic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(8): 1-15(in Chinese with English abstract).
- [25] 刘战庆. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带地质特征及区域构造研究[D]. 西安: 长安大学博士学位论文, 2011: 1-152.  
Liu Zhanqing. Study on the Geological Characteristics and Tectonic of Buqingshan Melanges Belt, the South Margin of East Kunlun Mountains[D]. Xi'an: Ph. D. thesis at Chang'an University, 2011: 1-152(in Chinese with English abstract).
- [26] 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(12): 1121-1135.  
Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, et al. Mian Lue tectonic belt and Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Science in China(Series D)*, 2003, 33(12): 1121-1135(in Chinese).
- [27] 裴先治, 张国伟, 赖绍聪, 等. 西秦岭南缘勉略构造带主要地质特征[J]. 地质通报, 2002, 21(8/9): 484-494.  
Pei Xianzhi, Zhang Guowei, Lai Shaocong, et al. Main geological features of the Mianlue tectonic belt on the southern margin of the West Qinling[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(8/9): 484-494(in Chinese with English abstract).
- [28] Pearce J A. A user's guide to basalt discrimination diagrams[J]. *Geology of Canada, Short Course Notes*, 1996, 12: 79-113.
- [29] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 1971, 8: 523-548.
- [30] Richard A Stern, Eric C Syme, Stephen B Lucas. Geochemistry of 1.9Ga MORB-like basalts from the Amisk collage, Flin Flon Belt, Canada: Evidence for an intra-oceanic origin[J]. *Geochemica et cosmochemica Acta*, 1995, 59(15): 3131-3154.
- [31] Melson W G, Vallier T L, Wright T L. Chemical diversity of abyssal volcanic glass erupted along Pacific, Atlantic and Indian Ocean seafloor spreading centers[C]//Sutton G H, Manghani M H. *The Geophysics of the Pacific Ocean Basin and its Margin*. Washington D C: Am Geophys Union, 1976: 351-367.
- [32] 侯增谦, 莫宣学, 朱勤文, 等. “三江”古特提斯地幔热柱——洋岛玄武岩证据[J]. 地球学报, 1996, 17: 343-360.  
Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Zhu Qinwen, et al. Mantle plume in the Sanjiang Paleo-Tethyan Region, China: Evidence from Ocean-Island Basalts[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1996, 17: 343-360(in Chinese with English abstract).
- [33] Clague D, Paduan J, McIntosh W, et al. A submarine perspective of the Honolulu Volcanics, Oahu[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, 15: 279-307.
- [34] Gaffnef A, Nelson B, Blichert-Toft J. Geochemical constraints on the role of oceanic lithosphere in intra-volcano heterogeneity at West Maui, Hawaii[J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45: 1663-1687.
- [35] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[C]//Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 1984: 63-114.
- [36] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Sunderson A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol Soc. London S-pec Pub. , 1989, 42: 315-345.
- [37] 冀六祥, 欧阳舒. 青海中东部布青山群抱粉组合及其时代[J]. 古生物学报, 1996, 35(1): 1-25.  
Ji Liuxiang, Ou Yangshu. Spore-pollen assemblage from Buqingshan group, Qinghai and its geological age[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1996, 35(1): 1-25(in Chinese with English abstract).
- [38] 殷鸿福, 张克信, 陈能松, 等. 中华人民共和国区域地质调查报告: 冬给措纳湖幅(I47C001002), 1:250000[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003: 1-457.  
Yin Hongfu, Zhang Kexin, Chen Nengsong, et al. The People's Republic of China Regional Geological Survey Report of Donggecuonahu(I47C001002), 1: 250000[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2003: 1-457(in Chinese).
- [39] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56: 207-218.
- [40] Wood D A. 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*, 1980, 50(1): 11-30.
- [41] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary*



- Science Letters, 1973, 19: 290–300.
- [42] 李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的Ba–Th–Nb–La判别图[J]. 岩石学报, 1993, 9(2): 146–157.
- Li Shuguang. Ba–Nb–Th–La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9(2): 146–157(in Chinese with English abstract).
- [43] Yildirim Dilek, Harald Fumes. Ophiolite geneses and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere[J]. Geological Society of America Bulletin, 2011, 123: 387–411, doi: 10.1130/B30446.1.
- [44] 边千韬, 罗小全, 李涤薇, 等. 青海省阿尼玛卿带布青山蛇绿混杂岩的地球化学性质及形成环境[J]. 地质学报, 2001, 75(1): 45–55.
- Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Li Dihui, et al. Geochemistry and formation environment of the Buqingshan Ophiolite Complex, Qinghai Province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(1): 45–55(in Chinese with English abstract).
- [45] Weaver B L, Wood D A, Tarney J, et al. Role of subducted sediment in the gneiss of ocean land basalts: Geochemical evidence from South Atlantic Ocean islands[J]. Geology, 1986, 14: 275–278.
- [46] Weaver B L, Wood D A, Tarney J, et al. Geochemistry of ocean island basalts from the South Atlantic: Ascension, Bouvet, St. Helena, Gough and Tristan Da Cunha[C]//Fitton J G, Upton B G J (ed.s). Alkaline Igneous Rocks. Geological Society, London. Geol. Soc. Spec. Publ., 1987, 30: 253–267.
- [47] Weaver B L. Trace element evidence for the origin of ocean–island[J]. Geology, 1991, 19: 123–126.
- [48] Pearce J A, Peate D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1995, 23: 1073–1109.
- [49] 朱永峰, 徐新, 魏少妮, 等. 西准噶尔克拉玛依OIB型枕状玄武岩地球化学及其地质意义研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(7): 1739–1748.
- Zhu Yongfeng, Xu Xin, Wei Shaoni, et al. Geochemistry and tectonic significance of OIB–type pillow basalts in western Mts. of Karamay city(western Jungaar), NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(7): 1739–1748(in Chinese with English abstract).
- [50] Lundstrom C C, Hoernle K, Gill J. U–series disequilibria in volcanic rocks from the Canary Islands: Plume versus lithospheric melting[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67: 4153–4177.
- [51] 韩江伟, 熊小林, 朱照宇. 雷琼地区晚新生代玄武岩地球化学: EM2成分来源及大陆岩石圈地幔的贡献[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3208–3220.
- Han Jiangwei, Xiong Xiaolin, Zhu Zhaoyu. Geochemistry of Late–Cenozoic basalts from Leiqiong area: The origin of EM2 and the contribution from sub–continental lithosphere mantle[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(12): 3208–3220(in Chinese with English abstract).
- [52] 侯增谦, 莫宣学, 朱勤文, 等. “三江”古特提斯地幔热柱——洋中脊玄武岩证据[J]. 地球学报, 1996, 17: 362–375.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Zhu Qinwen, et al. Mantle plume in the Sanjiang Paleo–Tethyan Lithosphere: Evidence from Mid–Ocean Ridge Basalts[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1996, 17: 362–375(in Chinese with English abstract).
- [53] Schilling J G, Thompson G, Kingsley R, et al. Hotspot–migrating ridge interaction in the South Atlantic [J]. Nature, 1985, 313: 187–191.
- [54] 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 108–110.
- Zhang Qi, Zhou Guoqing. Ophiolites of China[M]. Beijing: Science Press, 2001: 108–110(in Chinese).
- [55] Yang Jingsui, Robinson P T, Jiang Chunfa, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications[J]. Tectonophysics, 1996, 258: 215–231.
- [56] 陈亮, 孙勇, 裴先治, 等. 古特提斯蛇绿岩的综合对比及其动力学意义——以德尔尼蛇绿岩为例[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(12): 1136–1142.
- Chen Liang, Sun Yong, Pei Xianzhi, et al. Comparison of eastern Paleo–Tethyan Ophiolites and its geodynamics significance——Evidence from Dur'ngoi ophiolite[J]. Science in China(Series D), 2003, 33(12): 1136–1142(in Chinese).
- [57] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 73–110.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 73–110(in Chinese).
- [58] 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 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[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 244–254.
- Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, et al. Geological characteristics of Late Palaeozoic–Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in Eastern Kunlun[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 244–254(in Chinese with English abstract).

## Geochemical characteristics and geological implications of Haerguole basalt in Buqingshan area on the southern margin of East Kunlun Mountains

YANG Jie<sup>1</sup>, PEI Xian-zhi<sup>1,2</sup>, LI Rui-bao<sup>1,2</sup>, LI Zuo-chen<sup>1,2</sup>, LIU Zhan-qing<sup>3</sup>,  
PEI Lei<sup>4</sup>, LIU Cheng-jun<sup>1</sup>, CHEN You-xin<sup>1</sup>, CHEN Guo-chao<sup>1</sup>, GAO Jing-min<sup>1</sup>

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The Haerguole seamount basalt is located in Buqingshan area on the southern margin of the East Kunlun Mountains. Detailed geochemical analysis shows that the Haerguole seamount basalt can be divided into alkaline basalts and subalkaline basalts. The REE distribution patterns of alkaline basalts are similar to those of OIB, with the data  $\sum \text{LREE}=63.8 \times 10^{-6} \sim 175.36 \times 10^{-6}$ ,  $\sum \text{HREE}=14.46 \times 10^{-6} \sim 28.56 \times 10^{-6}$ ,  $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}=4.41 \sim 6.14$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=4.14 \sim 6.71$ ,  $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}}=3.31 \sim 5.12$ , and  $\delta\text{Eu}=1.03 \sim 1.17$ . The REE distribution patterns of subalkaline basalts are similar to those of N-MORB, with the data  $\sum \text{LREE}=11.07 \times 10^{-6} \sim 29.95 \times 10^{-6}$ ,  $\sum \text{HREE}=12.56 \times 10^{-6} \sim 25.41 \times 10^{-6}$ ,  $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}=0.88 \sim 1.54$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.29 \sim 0.74$ ,  $(\text{Ce}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.37 \sim 0.77$  and  $\delta\text{Eu}=1.02 \sim 1.22$ . These geochemical characteristics suggest that the Haerguole basalt is the association of OIB and N-MORB. The OIB of Haerguole seamount basalt was formed in a seamount or an ocean island setting near the mid-ocean ridge, and OIB magma originated from EM II-type enriched mantle. The N-MORB was formed in a mid-ocean ridge setting and originated in depleted mantle. These data provide more evidence for the existence of ocean basin in Buqingshan area in Late Paleozoic.

**Key words:** Buqingshan; Haerguole; basalt; OIB; N-MORB

---

**About the first author:** YANG Jie, male, born in 1987, master candidate, mainly engages in the study of tectonics; E-mail: yangjierz@163.com.