

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.01.003

东升庙地区基性岩系变质作用过程

王艺茜¹, 梁婷¹, 戴霜², 王崇礼¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 兰州大学资源环境学院
西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:狼山地区位于华北克拉通北缘内蒙古狼山西段, 该区构造演化变形强烈, 根据基性变质岩系的产出地层时代、产状以及它们与不同期次的变质、变形乃至混合岩化作用的关系, 将基性岩系地体按形成时序划分出 4 个期次。不同产状及期次划分的基性系列变质岩为恢复区域地质演化史提供了重要信息。笔者通过岩相学观察、化学全分析和电子探针等手段对不同期次变质岩的岩石学和矿物学特征进行研究, 探讨其温压条件和构造背景。岩石学特征表明, 狼山基性变质岩除绿片岩外, 原岩都为基性火山岩。第一期斜长角闪岩富集 Pb、K、Nb、Ta, 存在明显亏损, Hf、Zr、Ti 弱亏损, 轻重稀土分异较明显, 属于岛弧玄武岩; 第二、三期斜长角闪岩具有板内和岛弧过渡的特点; 第四期脉状斜长角闪岩轻稀土相对较低, 表现为产生在板内张裂环境侵位环境。绿片岩 Sr、K、Rb、Ba 亏损而 Th 的明显富集具有岛弧或弧后盆地玄武岩的特征。选用斜长石、角闪石共生矿物计算各期斜长角闪岩所经历过变质作用的温度和压力。第一期斜长角闪岩计算得出其属于早期高角闪岩相-麻粒岩相; 第二期玄武岩计算得出其代表了早期为角闪岩相晚期向低角闪岩相退变的变质过程; 第三期斜长角闪岩计算得出其属于低角闪岩相; 第四期斜长角闪岩属于接触变质的绿帘角闪岩相。

关键词:基性变质岩; 岩石学; 地质温度计; 狼山

中图分类号:P588.12⁺5

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2019)01-0023-18

Metamorphic Evolution of Basic Rock Series in Dongshengmiao Area, Inner Mongolia

WANG Yiqian¹, LIANG Ting¹, DAI Shuang², WANG Chongli¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of
Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Langshan area is located in the western section of the northern margin of North China Craton. This area has experienced complex tectonic evolution, the different occurrence and different stages of basic metamorphic rocks in Langshan area provide important information for the inversion of their regional geological evolution history. The petrological and mineralogical characteristics of metamorphic rocks in various periods have been studied by the means of petro-

收稿日期:2018-05-15;修回日期:2018-09-26

基金项目:中国地质调查局“中国矿产质与成矿规律综合集成和服务”(DD20160346)资助,兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2017-k27)资助

作者简介:王艺茜(1994-),女,硕士研究生,矿产勘探与普查。E-mail:283836514@qq.com

graphic observation, chemical total analysis and electron probe. According to the age, occurrence of basic metamorphic rocks and their relationship with the metamorphism, deformation and migmatization of basic metamorphic rocks, these basic metamorphic rocks can be divided into four stages according to their sequence of formation. The petrological results show that the primary rocks except greenschist are basic volcanic rocks. In the first phase of the amphibolite enrichment, there is a significant depletion of Pb, K, Nb and Ta, with weak depletion of Hf, Zr and Ti. The difference between light and heavy rare earths is obvious, belonging to the island arc basalt. The second and third stages of amphibolite are characterized by intraplate and island arc transitions. In the fourth stage, the light rare earth elements of the amphibolite are relatively low, which is manifested by the emplacement environment in the intraplate tension crack environment. The greenschist is depleted in Sr, K, Rb, Ba, but enriched in Th, which is characterized by basalt in island arc or back-arc basin. The plagioclase and amphibole symbiotic minerals have been used to calculate the temperature and pressure of metamorphism experienced by amphibolite in various periods. The first stage of amphibolite calculation shows that the amphibolite belongs to the early high amphibolite facies-granulite facies; The second stage of basalt calculation shows that it represents the metamorphic process from the late amphibolite facies to the low amphibolite facies in the early stage; The third stage of amphibolite has been calculated to be a low amphibolite facies; The fourth stage of amphibolite belongs to the contact metamorphic green-curtain amphibolite facies.

Keywords: basic metamorphic rock; petrology; geologic thermometer; Langshan

王文龙等(2017)对本区碰撞花岗岩的研究,张进等(2013)通过对狼山西南地区枕状玄武岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的测定,发现狼山晚古生代末期的玄武岩可能产自古亚洲洋封闭后由于岩石圈拆沉导致的伸展环境。该期伸展贯穿华北北缘直至阿拉善地块,暗示华北板块与阿拉善地块至少在晚古生代之前就已经拼合在一起。彭润民等(2013)通过对内蒙狼山新元古代酸性火山岩的研究,发现内蒙狼山西南段存在与新元古代 Rodinia 超大陆裂解作用相呼应的海相火山-沉积变质建造,内蒙狼山地区可能有与 Rodinia 超大陆裂解作用相呼应的构造-岩浆-热事件发生。蔡佳等(2012)通过对大青山-乌拉山变质杂岩中石拐地区富铝片麻岩的成因矿物学和变质作用方面的分析讨论,得出大青山-乌拉山变质杂岩中石拐地区富铝片麻岩可能是华北克拉通西部的古老陆块之间在碰撞造山过程中经历了麻粒岩相变质作用后折返至地表的产物。刘在铭等(2016)通过对东升庙地区乌拉岩群黑云斜长片麻岩、黑云斜长角闪岩、混合岩化黑云斜长片麻岩等变质岩石的原岩恢复,发现该岩群为一套以杂砂岩、中酸性火山碎屑沉积岩、玄武岩为主的火山岩-碎

屑沉积岩建造;结合稀土元素特征研究初步探讨了该岩群原岩形成于古大陆边缘岛弧环境。上述文献对于揭示狼山地区的区域地质演化史提供了帮助。

狼山古老变质杂岩在大地构造单元上隶属于“内蒙地轴”,是早前寒武纪不同时代形成的变质、变形各异的变质地体拼合体,然而关于狼山变质地体的研究工作目前还较少。

笔者在前人工作的基础上,按产出的时序以及产出围岩的变质、变形、混合岩化程度等,把研究区内的基性变质岩(包括:变质基性火山岩以及不同时代的变质基性脉岩)划分出 4 个期次。研究发现各期次基性变质岩石具有不同的矿物组合和形成的温压条件,而且各期次变质基性岩的岩石化学、稀土及微量元素地球化学特征各具特色。这些不仅证实了对基性岩系期次划分的可行性,还可以进一步利用上述特征来反演其区域地质演化史。

1 区域地质概况

狼山地区地处华北克拉通北缘,为华北克拉通北缘元古代—太古宙构造岩片拼合体,大地构造位于

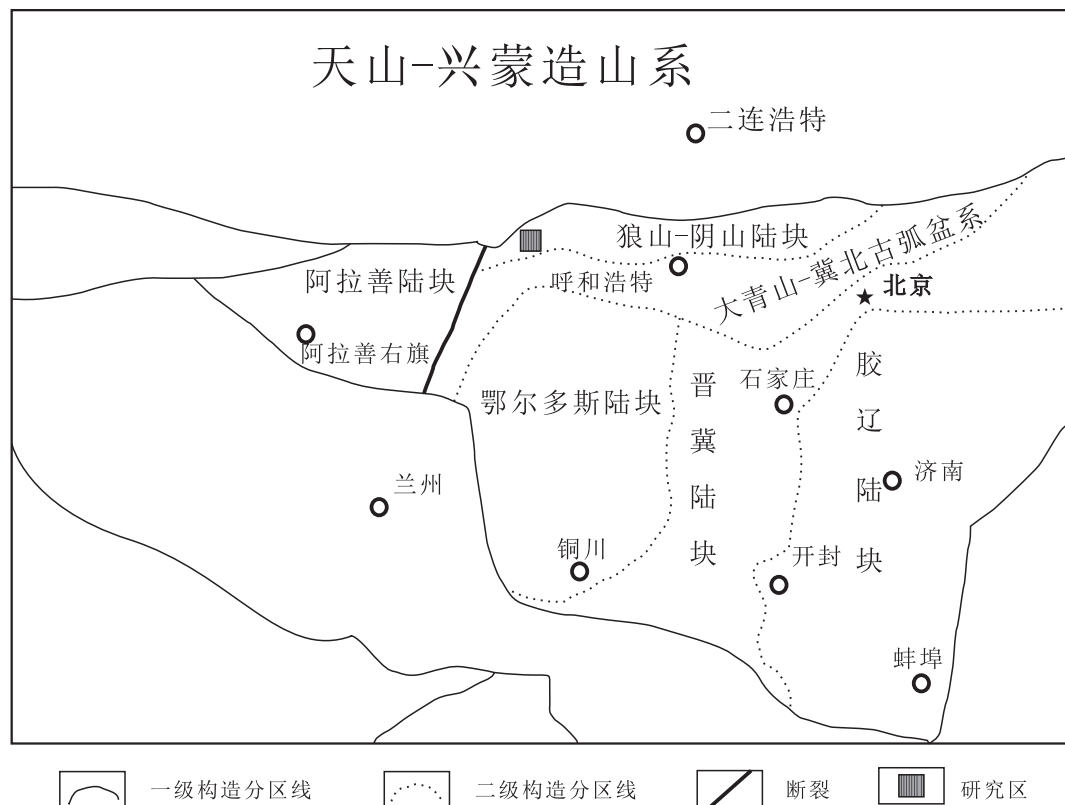


图 1 华北克拉通的组成图(据潘桂棠等 2009,简化)

Fig. 1 Composition of North China Craton(Simplified from PAN et al., 2009)

狼山-阴山陆块(潘桂堂等, 2009)(图 1)。研究区位于内蒙古乌拉特后旗赛乌素乡和东升庙镇, 按照内蒙古地层划分(表 1), 研究区位于华北地层区, 以狼山山前断裂为界分为 2 个分区和 2 个小区。北部山区隶属于阴山-奴鲁尔虎分区之白云鄂博小区; 南区平原区属鄂尔多斯-陕甘宁分区之河套小区。而变质地层仅分布于白云鄂博地层小区。由于地处陆缘构造活动带, 在经历多期次的拉伸、挤压以及拼合之后, 致使不同时代地层呈“洗牌”状重新拼接; 而高强度、多期次的酸性岩浆侵位更让地层出露得支离破碎。

变质地层由老到新主要有: 中太古宇乌拉山岩群清格勒岩组、阿贵图岩组; 新太古宇色尔腾山岩群乌苏台组、帮帮敖瑞组; 古元古界美岱召岩群查干扎拉格岩组(即高压绿片岩岩组); 中元古界渣尔泰山岩群书记沟组、增隆昌组、阿古鲁沟组。

中太古宇变质地体: 中太古宇乌拉山岩群清格勒岩组按岩性组合由下而上大体可以分为 3 个岩段。暗色片麻岩及斜长角闪岩段; 灰色片麻岩及黑云变粒岩段; 大理岩段。中太古宇乌拉山岩群阿贵图岩组为含石墨云母石英片岩段夹斜长角闪岩。中

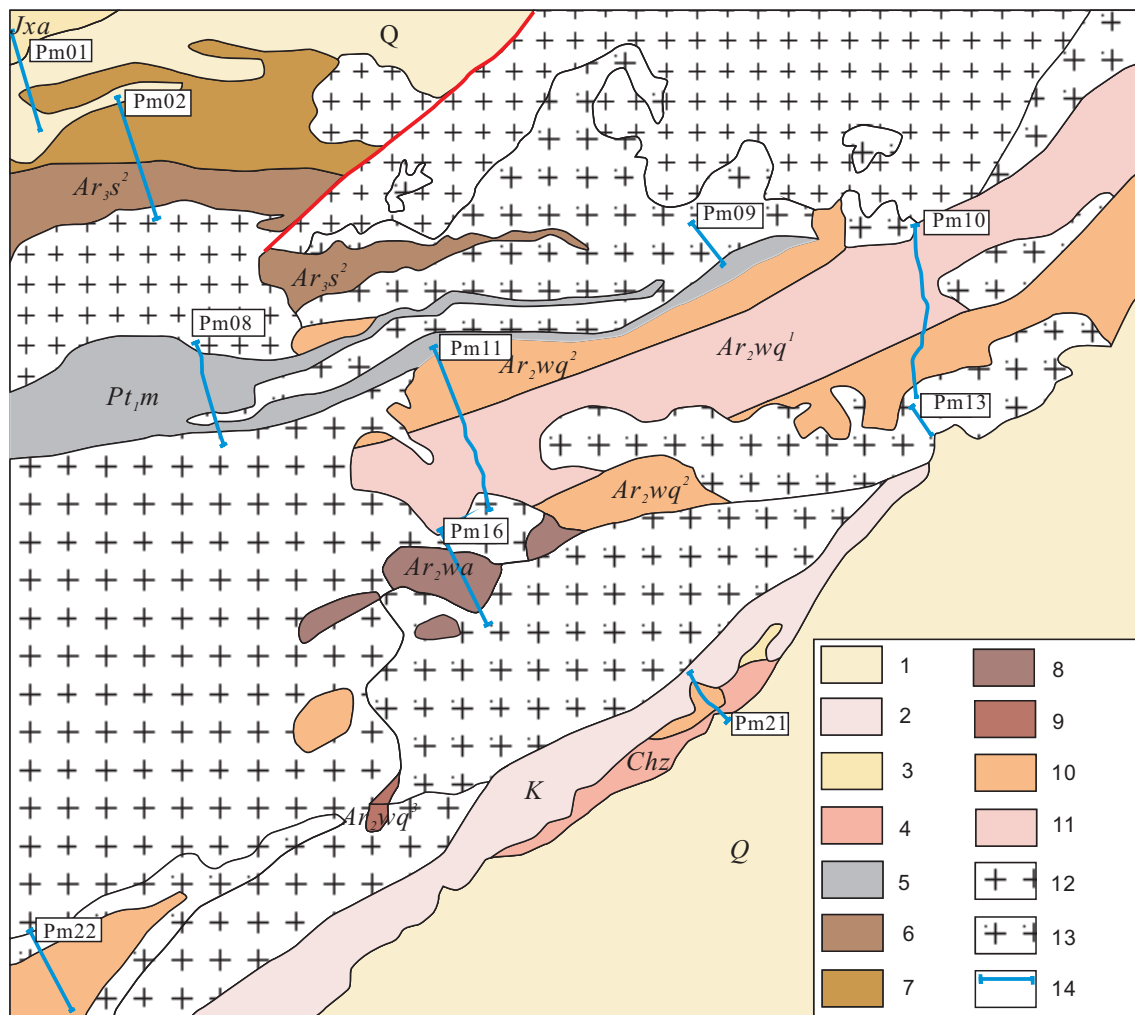
太古宇乌拉山岩群最少经历过 2 期以上区域变质作用的叠加再造, 变质程度分别达到高角闪岩相和角闪岩相。中太古宇乌拉山岩群最少也经历过 2 期以上混合岩化改造。早期以钠长英质混合岩化为主, 晚期是以钾长英质混合岩化为特征。中太古宇乌拉山岩群也经历过多期次变形, 常见有大小不等、形态各异的叠加褶皱(图 2)。

新太古宇变质地体: 新太古宇色尔腾山岩群按岩性组合由下而上大体可以分为 2 个岩段, 石英岩段和二云石英片岩段。新太古宇色尔腾山岩群变质地层以陆源碎屑沉积变质岩为主, 偶见夹有变质泥灰岩岩层。变质程度为低角闪岩相(或绿帘角闪岩相)。未见中太古宇变质, 褶皱宽缓, 变形亦较为简单, 未见有多期变形叠加, 亦未见有区域混合岩化叠加改造。

古元古界变质地体: 古元古界美岱召岩群变质地层是一套夹持在中太古宇乌拉山岩群和新太古宇色尔腾山岩群之间断续而狭长分布的高压绿片岩相的火山沉积变质地体。古元古界美岱召岩群查干扎拉格岩组主要由阳起片岩、钙质绿泥片岩、含硬绿

表 1 前寒武纪地层划分简表
Tab.1 Summary table of Precambrian stratigraphic division

年代地层		岩石地层		图中 编号	代表 剖面	代表岩性	区域 变质相	混合岩 化发育 情况	接触变质 叠加状况	地层构造及变质变 形特征;变质地体 形态及产出特征
界	系统	岩群	组							
中元古界	蓟县系	渣尔泰山岩群	阿古鲁沟组	Jxa	PM01	大理岩。碳质板岩。绿泥钙质片岩	低压绿片岩相	无混合岩化	可见接触变质的砂线石。红柱石。堇青石角岩化叠加再造	产状陡立的单斜构造,以及置换片理
	长城系		增隆昌组	Chz		结晶灰岩。变质粉砂岩。砂质板岩				
			书记沟组	Chs		绢云石英片岩。变质砂岩。变质长石石英砂岩				
	溱沱群									
古元古界	五台群	美岱召岩群	查干扎拉格岩组	Pt ₁ m	PM08	绿片岩段:主要为阳起片岩岩;钙质绿泥片岩;含硬绿泥石绿片岩以及榴云片岩组成	高压绿片岩相	无混合岩化	偶见接触变质矿物:红柱石	层理及片理面可辨,并呈高角度产出。变质地体呈出露宽度不等的带状及线状不连续地体,分布于乌拉山岩群和色尔腾山岩群之间,作为构造岩片产出。可见更晚构造片理化的叠加再造
新太古宇	色尔腾山(岩)群	色尔腾山岩群	二云片岩岩组 石英岩组	Ar ₃ s	PM02	二云石英片岩段 石英岩段	绿帘角闪岩相	偶然可见边缘混合岩化	多见角闪角岩相及辉石角岩相接触变质(硅线石;红柱石角岩;倍长角闪岩)	层理可辨,褶皱平缓的变质地层。较少发现叠加褶皱和片内褶皱。变质地体呈面状分布
中太古宇	乌拉山(岩)群	乌拉山群	阿贵图岩组	Ar ₂ wa	PM16	含石墨云母石英片岩段夹斜长角闪岩	高角闪岩相及角闪岩相等多期变质	可见钾长英质混合岩化	偶见辉石角岩相接触变质(倍长角闪岩)	可见紧闭同斜褶皱。貌似高角度单斜产出。可见片内褶皱。变质地体呈宽带状分布,主要产出在乌拉山岩群的枢纽沉降部位和清格勒岩组的南部与清格勒岩组呈断裂接触
				Ar ₂ wg ³		第三岩段:大理岩段		夹持在第一、二段混合岩层之中 普遍发育:钠质、钾质2期混合岩化	可见叠加的接触变质作用。但因已经处在角闪岩相变质背景之山所以难以识别	似层状及透镜状及不规则残体
			清格勒岩组	Ar ₂ wg ²	PM09 PM10 PM11 PM13 PM22等	第二岩段:灰色片麻岩及黑云变粒岩段				
				Ar ₂ wg ¹		第一岩段:暗色片麻岩及斜长角闪岩段				



1. 第四系;2. 白垩系;3. 中元古界渣尔泰山群蓟县系阿鲁沟组;4. 长城系增隆昌及书记沟组;5. 古元古界美岱召岩群绿片岩组;6. 古元古界美岱召岩群二云石英片岩组;7. 古元古界美岱召岩群石英岩组;8. 新太古宇阿贵图组富石墨云母石英片岩、片麻岩及斜长角闪岩岩组;9. 新太古宇清格勒岩组大理岩段;10. 新太古宇清格勒岩组灰色片麻岩及黑云变粒岩岩段;11. 新太古宇清格勒岩组暗色片麻岩及斜长角闪岩岩段;12. 晚古生代—中生代花岗岩;13. 元古宙花岗岩;14. 剖面及编号

图2 狼山变质地层分布示意图

Fig. 2 The distribution of Langshan metamorphic strata

泥质绿片岩及榴云片岩组成。古元古界美岱召岩群查干扎拉格岩组为受混合岩化影响,变形单一,呈高角度单斜构造岩片产出,片理化十分发育。

中元古界变质地体:中元古界渣尔泰山岩群按岩性组合由下而上大体可以分为3个岩组。①书记沟组:以绢云石英片岩、变质砂岩、变质长石石英砂岩为主组成。②增隆昌组以结晶灰岩、变质粉砂岩、砂质板岩为主组成。③阿古鲁沟组以大理岩、碳质板岩、绿泥钙质片岩组合为特征。中元古界渣尔泰山岩群具有产状陡立的单斜构造,以及广泛发育有置换片理。中元古界渣尔泰山岩群呈千枚状,板状

构造多见,区域变质仅达到低绿片岩相,常见受到中酸性岩体的接触变质再造。

2 基性岩的期次划分及产出特征

狼山变质基性岩发育,根据野外调查,不同地段变质程度差异明显,可分为斜长角闪岩类和绿片岩类。

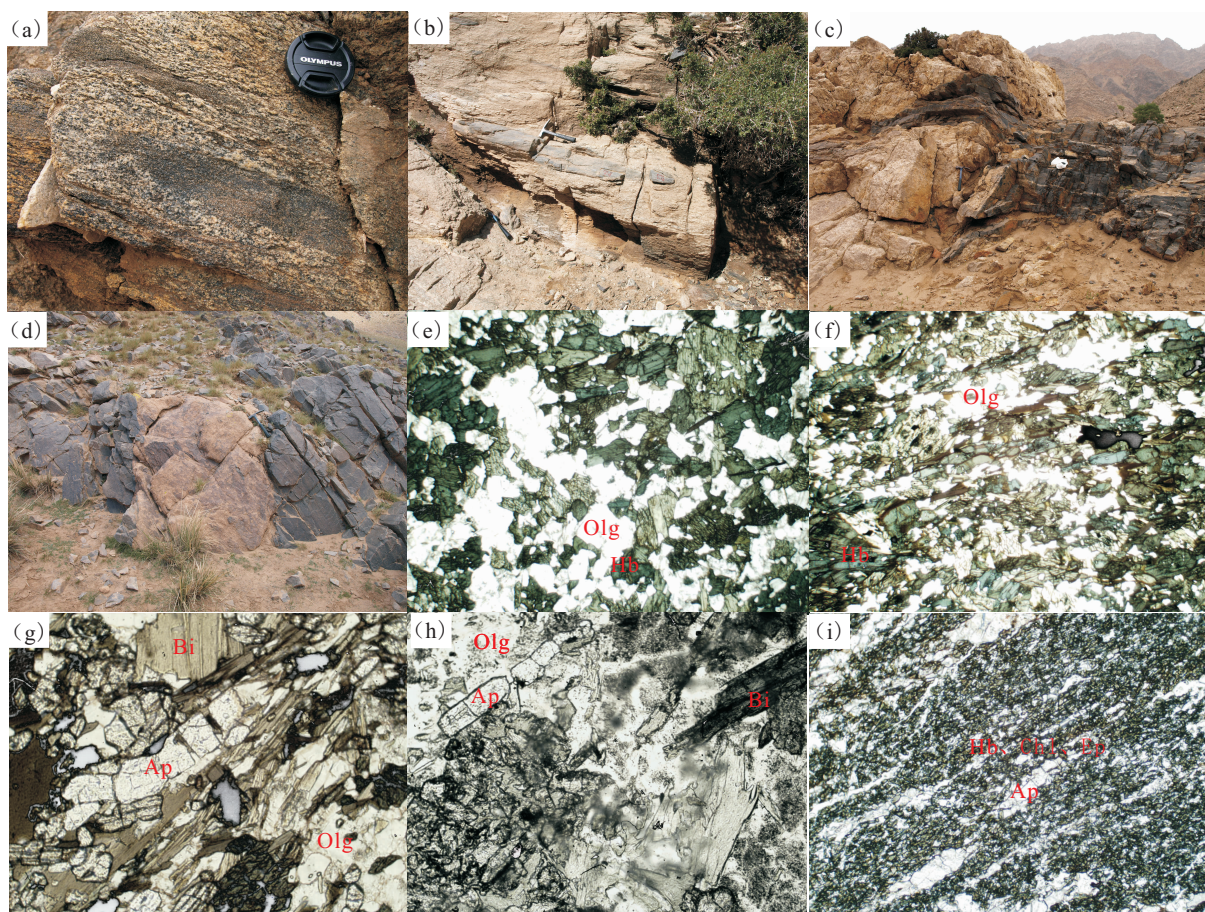
2.1 斜长角闪岩类

根据产状、变质程度和所处的地层时代,可以划分为4期。

第一期:层状斜长角闪岩类。出露在新太古宇乌拉山岩群的层状斜长角闪岩大多经历过不同程度混合岩化再造,呈残层状、透镜状作为混合岩化的黑云角闪斜长片麻岩的基体残层产出,出露面积较大。作为中太古宇乌拉山岩群青格勒岩组的古老变质地层经历过最少 2 期以上的区域变质、变形以及钠长英质和钾长英质 2 期混合岩化作用的再造。

按矿物组合和结构构造,该期斜长角闪岩类包括的岩石类型有:斜长角闪岩(PM11-b17);黑云斜

长角闪岩(PM11-b18);混合岩化黑云斜长角闪岩(PM10-b20、PM11-b12)。岩石呈柱粒状变晶结构,块状及片状构造。此岩石中的长石为中奥长石,无双晶具环带,他形粒状镶嵌变晶;角闪石为中高温变质相的变质角闪石:(含铁韭闪石质角闪石、含铁浅闪石质角闪石、铁浅闪石以及浅闪石等),呈他形柱状-柱粒状变晶,个别呈筛状变晶;黑云母较少叠加于角闪石之上;他形粒状微斜长石分布不均,多出现在钾长英混合脉体注入部位(图 3e)。



(a)、(b). 残留在混合岩化黑云斜长片麻岩中的斜长角闪岩;(c). 切穿混合岩化变质地层的“脉状”二期斜长角,即同时又经历了:晚期混合脉体的注入和晚期角闪岩相的区域变质的叠加再造;(d). 含黝帘斜长角闪岩岩脉切穿变质岩地层,但二者变质变质片理一致,即同时又经历了:晚期绿帘角闪岩相的区域变质的叠加再造;(e). 黑云斜长角闪岩(PM11b18 样品);(f). 黑云斜长角闪片岩;(g). 含黝帘斜长角闪片岩;(h). 片状(正)斜长角闪岩镜下照片;(i). 钙质钠长阳起片岩

图 3 四期基性变质岩的产出状态和显微照片

Fig. 3 The photos of output state and photomicrographs for four phase basic metamorphic rock

第二期:脉状斜长角闪岩类。其最大特点是呈脉状产出,不仅“斜切”了混合岩化变质地层,也“切割”了混合岩脉体,但是脉状斜长角闪岩自身的定向构造却依然继承了区域变质地层的构造方向(属再生继承

片理)又沿此片理面发生晚期钾长英脉体的注入(图 3c)。这不仅说明该期原岩为古老基性岩脉,而且说明在此脉岩侵位之后(以及混合岩化变质地层生成之后)还叠加发生了另一期角闪岩相的区域变质作用和

更晚期微弱的钾长英混合岩脉体的注入。

岩石呈柱粒状变晶结构,片状构造,岩石具有不清晰的变余辉绿结构,岩石以中-奥长石粒状变晶和蓝绿色柱状角闪石为主(角闪石为中高级变质的铁闪石及铁闪石质角闪石),伴有黑云母和少量的石英。柱状角闪石与片状黑云母具定向结构,片状构造。岩石偶见混合岩化成因的石英、钾长石脉体以及渗透交代物,因此该岩石生成于晚期混合岩化之前(图 3f)。

第三期:绿帘斜长角闪岩。岩石亦呈脉状产出,亦应属于变质基性脉岩。但不同的是本期次变质基性岩脉主要出现在新太古宇色尔腾山岩群的乌苏台岩组。乌苏台岩组地层发生区域变质作用之前,受到此次基性岩脉的侵入,此后又经历了大体一致的区域变质作用;不仅变质程度如此,就按绿帘斜长角闪岩自身的变质构造线方向也同乌苏台变质地层的构造线完全一致。因此,本期绿帘斜长角闪岩应是形成于乌苏台岩组地层沉积之后,区域变质变形作用发生之前的侵位。

岩石呈纤柱状变晶结构,片状构造。岩石经历了较强的区域变质、变形改造。从局部可见由细粒长石聚集的板条状长石假象以及自形的柱状磷灰石残晶(图 3g),可以判定岩石具有变余辉绿结构残留。岩石主要由奥长石、淡蓝绿色角闪石、绿帘石组成,属于变质基性岩在绿帘角闪岩相的典型组合。淡蓝绿色角闪石(图 3b)主要是阳起质角闪石、镁角闪石,而在上述角闪石的核可见原辉绿岩的含铁韭闪石残留。

第四期:接触变质斜长角闪岩呈脉状侵位于中元古代渣尔泰山岩群的书记沟岩组。本应表现为与书记沟岩组同样经历的绿片岩相变质再造。但因受晚期花岗岩的烘烤,经历了接触变质改造,所以致使该期基性岩脉达到绿帘角闪岩相变质程度,但该期次基性岩脉中仍然可见变余辉绿结构和自形磷灰石,证实其原岩属基性火成岩脉(辉绿岩)。

在柱粒状变晶结构中可见变余辉绿结构残留。如长石板条状交代假象,自形磷灰石变余柱状晶体。另外,钛磁铁矿也多见,证实原岩为辉绿岩(图 3h)。岩石主要由奥长石、镁角闪石、绿帘石、黑云母组成,亦可见自形柱状磷灰石变余晶体。

2.2 绿片岩类

呈层状出露在古元古代美岱召岩群的查干扎拉

格岩组,即绿片岩段。岩石具有鳞片变晶结构(绿泥石为主时)或纤柱状变晶结构(阳起石为主时),未见变余火成组构。片状构造。矿物组合以阳起石或绿泥石为主、钠长石次之,见少许绿帘石、石英以及不等含量的碳酸盐矿物。

3 原岩恢复

3.1 判别正副基性变质岩的主量元素证据

基型变质岩的化学成分是划分岩石类型、成因及确定古构造环境的指示剂(TOW S H, et al., 1984)。在野外产出和岩矿鉴定观察的基础上,进一步使用岩石化学数据及其图解判定层状斜长角闪岩和层状绿片岩原岩类型。变质基性岩系按产状可以分为层状和脉状 2 个大类。

(1) 层状产出的斜长角闪岩。其又可以按原岩性质和变质程度的不同划分为:①层状正变质斜长角闪岩(图 4、图 5、图 6 中的投影点 1、2、14、15)。②层状副变质斜长角闪岩(图 4、图 5、图 6 中的投影点 19、20)。③层状正变质绿片岩(图 4、图 5、图 6 中的投影点 8、9、10、11)。④层状副变质绿片岩(图 4、图 5、图 6 中的投影点 12、13)。

(2) 脉状产出的斜长角闪岩。前述第Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ期斜长角闪岩皆为脉状产出,属正变质斜长角闪岩,无需再利用岩石化学数据和图解进行正副变质判定(表 2)。

样品的 TiO_2 质量分数为 0.32%~3.4%,较活动大陆边缘玄武岩(0.85%)要高,介于岛弧火山岩(0.58%~0.85%)和 MORB 型拉斑玄武岩(1.5%)之间。变基性岩石的 MgO 、 CaO 、 FeO 含量对其原岩具有较好的指示意义。利用图 4、图 5、图 6 基本上可以看出乌拉山岩群的层状斜长角闪岩(1、2、14、15)和美岱召岩群绿片岩(8、9、10、11)都应源自基性火山岩。而层状拉长角闪岩(19、20 号投影点)在图 6 中分别中亦落入Ⅳ区(钙质沉凝灰岩区)和Ⅵ区(钙质泥灰岩区);在图 5 中落入Ⅱ副变质斜长角闪岩区;应划归沉积变质成因的斜长角闪岩类岩石。但层状绿片岩(12、13)在主量元素(岩石化学图解图 4、图 5、图 6)图解上与正变质绿片岩难以区分。但在微量元素图解(见后文及图 11)明确落入副变质斜长角闪岩区。

表 2 变质基性岩的主要元素分析结果(wt%)
Tab. 2 Major elements(wt%) of basic metamorphic rock

样号	地层	地层名称	岩石名称	投影编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	Σ1
PM11b12-2	I	第一期层状斜长角闪岩类	钾长英混合岩化 黑云斜长角闪岩	1	73.37	0.06	14.63	0.11	0.43	0.01	0.05	0.81	3.46	5.47	0.10	0.00	98.50
PM11b18-3	I	第一期层状斜长角闪岩类	黑云斜长角闪岩	2	57.44	0.40	13.97	1.60	6.41	0.14	6.22	8.09	3.46	1.21	0.21	0.00	99.15
PM11b10	II	第二期:状斜长角闪岩类	黑云斜长角闪(片)岩	3	49.39	2.71	12.79	2.83	11.29	0.22	6.69	6.25	1.73	3.44	0.50	0.00	97.84
PM11b15	II	第二期:状斜长角闪岩类	斜长角闪(片)岩	4	45.04	1.74	12.38	3.30	13.18	0.28	5.67	11.79	2.58	0.90	0.23	0.00	97.09
PM02b03	III	第三期:绿帘斜长角闪岩	含黝帘斜长角 闪片岩(正变质)	5	50.31	1.97	13.48	2.37	9.48	0.18	8.31	12.26	0.86	0.96	0.14	0.00	100.33
PM02b05	III	第三期:绿帘斜长角闪岩	(绿泥石化黑云绿帘) 斜长角闪片岩(正变质)	6	46.12	3.40	13.70	2.92	11.67	0.19	3.72	10.16	1.94	2.59	1.15	0.00	97.55
PM01b05	IV	第四期:受接触变质的 斜长角闪岩	片状(正)斜长角闪岩	7	51.12	0.83	16.15	2.65	10.58	0.26	6.69	8.26	4.01	0.34	0.06	0.00	100.96
CB1	Pt _{1m}	古元古界 美岱召岩群	阳起片岩	8	49.80	1.01	13.87	2.36	9.41	0.21	7.72	11.41	2.27	0.24	0.09		98.37
CB2	Pt _{1m}	古元古界 美岱召岩群	阳起片岩	9	49.96	1.03	13.02	2.37	9.46	0.22	7.94	11.38	2.13	0.25	0.08		97.83
DB6	Pt _{1m}	古元古界 美岱召岩群	钠长阳起片岩/ 黑云石英片岩	10	53.38	1.10	13.94	1.81	8.21	0.17	6.08	9.34	1.99	2.34	0.10	0.00	98.46
DB8	Pt _{1m}	古元古界 美岱召岩群	钠长阳起片岩	11	51.83	1.09	13.51	1.89	8.54	0.16	7.44	9.60	2.08	1.50	0.09	0.00	97.74
PM08B6	Pt _{1m}	古元古界 美岱召岩群	钙质钠长阳起片岩	12	53.31	1.62	13.66	2.31	9.22	0.16	4.72	8.69	3.66	0.91	0.22	0.00	98.47
PM08B7	Pt _{1m}	古元古界 美岱召岩群	千枚(纹层)状钙质 绿泥微晶片岩	13	49.86	1.66	13.90	2.56	10.23	0.18	5.20	9.39	2.80	1.50	0.21	0.00	97.50
PM10b14	I	第一期层状斜长角闪岩类	钾长英条纹状混合 岩化黑云斜长角闪岩	14	51.21	1.19	13.59	2.45	9.78	0.28	7.20	8.26	2.62	3.30	0.15	0.00	100.03
PM11b17	I	第一期层状斜长角闪岩类	斜长角闪岩	15	44.65	1.88	13.75	2.80	11.17	0.26	8.16	13.50	1.96	1.44	0.14	0.00	99.71
PM10b06	II	第二期:状斜长角闪岩类	黑云斜长角闪岩	16	42.75	2.27	14.03	3.94	15.72	0.30	4.71	11.40	2.81	1.66	0.22	0.00	99.81
PM10b10	II	第二期:状斜长角闪岩类	黑云斜长角闪岩	17	52.56	0.63	15.04		8.98	5.80	0.12	4.43	5.10	4.99	1.80	0.33	99.78
PM11b06	II	第二期:状斜长角闪岩类	黑云斜长角闪(片)岩	18	47.58	1.58	13.01	3.10	12.39	0.21	8.36	9.18	1.30	2.11	0.17	0.00	98.99
PM02b08	Ar _{2s}	新太古宇 色尔腾岩组	拉长角闪片岩	19	54.73	0.78	11.89	1.50	6.03	0.17	9.56	13.88	0.05	0.26	0.11	0.00	98.96
PM16b08	Ar _{2w}	中太古宇 乌拉山岩群	层纹状(含石墨、透辉) 拉长角闪片岩	20	61.78	0.32	8.82	1.77	7.08	0.41	6.34	10.78	0.47	0.89	0.35	0.00	99.01

注:数据来源于甘肃省第二地质矿产勘查院,内蒙古乌拉特后旗东升庙等四幅1:5万区域矿产地质调查报告。

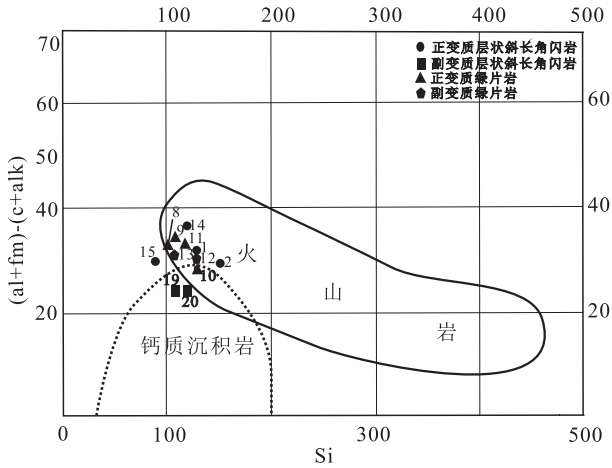


图 4 $[(al+fm)-(c+alk)]-Si$ 图(据西蒙南,1953 简化)
Fig. 4 $[(al+fm)-(c+alk)]-Si$ diagram(Simplified from XI,1953)

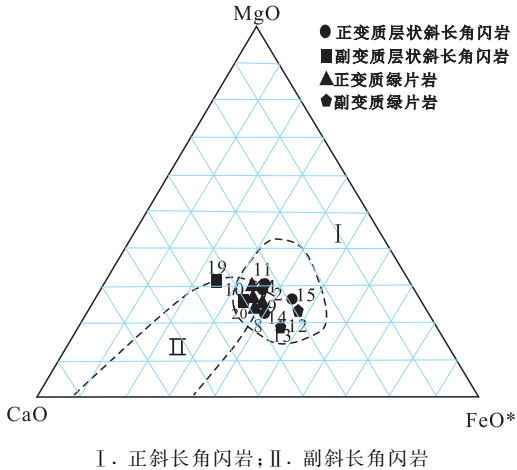


图 5 $MgO-CaO-FeO^*$ 图解(据沃克,1960)
Fig. 5 $MgO-CaO-FeO^*$ diagram(After Work,1960)

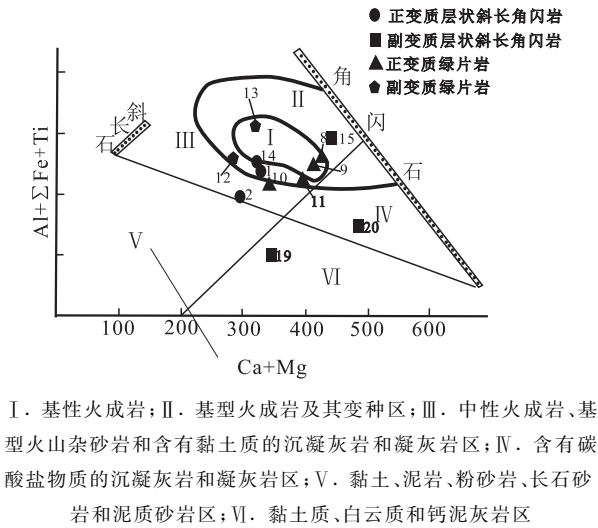
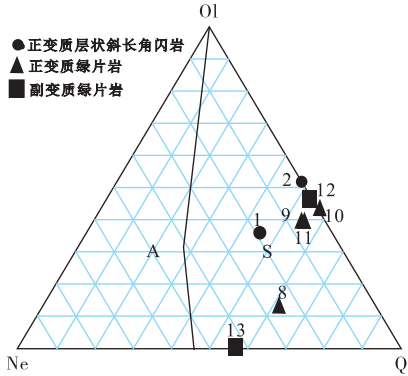


图 6 $(Al+\sum Fe+Ti)-(Ca+Mg)$ 图解
Fig. 6 $(Al+\sum Fe+Ti)-(Ca+Mg)$ diagram

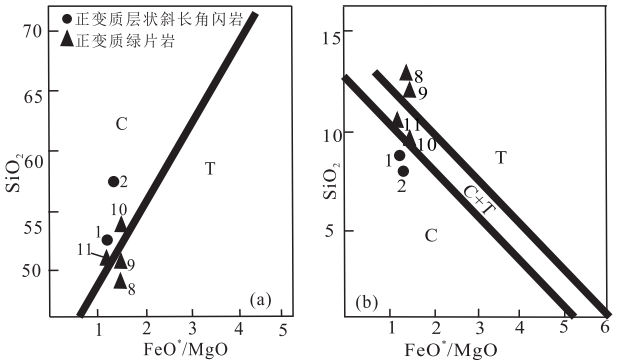
3.2 层状基性岩的地球化学

首先利用 T. N. IRVINE 等(1971)设计的 $Ol-Ne-Q$ 图解判定本区乌拉山岩组的正变质斜长角闪岩(1、2)和美岱召岩组的正变质绿片岩(8、9、10、11),它们均属亚碱性系列(图 7)。



A. 区为碱性玄武岩系列;S. 区为亚碱性玄武岩系列
图 7 $Ol-Ne-Q$ 图解(T. N. IRVINE,1971)
Fig. 7 $Ol-Ne-Q$ diagram(After T. N. IRVINE,1971)

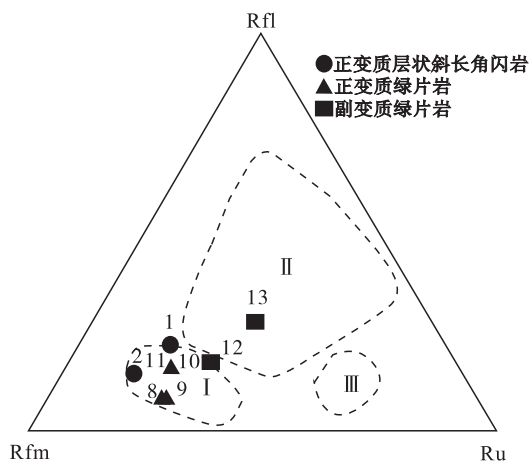
A. MIYASHIRO (1974) 的 FeO^*/MgO 与 SiO_2 、 FeO^* 图解判定乌拉山岩组的正变质斜长角闪岩(1、2)属钙碱性玄武岩类型(图 8)。而美岱召岩组正变质绿片岩的(8、9)落入拉斑玄武岩区;(10、11)落入拉斑玄武岩与钙碱性玄武岩类型的过渡区(C+T)。以上 2 个图解说明乌拉山岩群层状正变质斜长角闪岩的原岩为拉斑玄武岩系列的钙碱性玄武岩;美岱召岩群正变质绿片岩均属亚碱性系列的拉斑玄武岩类,但到底属于亚碱性系列的拉斑玄武岩类,还是钙碱性玄武岩类还应利用含微量元素和稀土元素的图解进一步探讨。



C. 区为钙碱性玄武岩系列;T. 区为拉斑玄武岩系列
图 8 FeO^*/MgO 与 SiO_2 、 FeO^* 图(A. MIYASHIRO,1974)
Fig. 8 FeO^*/MgO and SiO_2 、 FeO^* diagram
(After A. MIYASHIRO,1974)

3.3 微量元素特征

在图 9 中副变质绿片岩投影点 13 落入明显 II 区,副变质绿片岩投影点 12 均落在 I、II 两区的分界线上;正变质绿片岩投影点均投影点 8、9、10、11 及正变质层状斜长角闪岩投影点 1、2 都落在 I 区(正变质斜长角闪岩区)之中或其近旁。



I. 正变质斜长角闪岩区; II. 副变质斜长角闪岩区;
III. 变质沉凝灰岩

图 9 Rfm - Rfl - Ru 图解

Fig. 9 Rfm - Rfl - Ru diagram

3.4 形成环境

一般认为基性火山岩的 K、Na 和低场强元素(LFSE: Sr、Rb、Ba、Cs)在蚀变和变质作用过程中是活泼的,而高场强元素(HFSE: Ti、Zr、Y、Nb、Ta、Hf)、Th、过渡金属(Sc、V、Cr、Ni)和 REE 是不活泼的。因此在讨论岩石地球化学特征及成因时主要用不活泼元素(周汉文,等,1997)(表 3)。

根据微量元素 N 型洋中脊(MORB)标准化蛛网图(图 10),可以发现第一期斜长角闪岩 PM11b12、PM11b18 具有相似的曲线,Ti 负异常十分明显、Ta 明显亏损,与智利(钙碱性大陆性的)岛弧玄武岩的微量元素蛛网图十分相似(王仁民《变质岩原岩图判断法》),岩石相对富集大离子亲石元素 Pb、K,高场强元素 Nb、Ta 存在明显亏损,Hf、Zr、Ti 弱亏损,表现岛弧玄武岩特征(李伍平,等,1999)。Nb、Ta、Zr、Hf 等具有明显的负异常的特征也与岛弧基性岩有相似之同(MCCULLOCH M T, et al., 1991)。通常情况下大洋岛弧玄武岩 Nb 的含量小于 2×10^{-6} (PEARCE J A et al., 1995)。此外,K、

Rb、Ba 的富集也与混合岩化有关。其余 3 期斜长角闪岩具有板内和岛弧过渡的特点曲线及其成因特点,说明脉状斜长角闪岩的原岩生成环境与第 1 期斜长角闪岩有所不同。

绿片岩根据曲线也可以分为 2 类(图 11),CB1、CB2 具有相似的曲线,表现为洋中脊型和岛弧玄武岩的过渡特点,Sr、K、Rb、Ba 亏损而 Th 的明显富集。绿片岩 DB6、DB7 虽然样品中多或少都有泥沙质夹层或混入,导致 K、Rb、Ba 的增高,但蛛网曲线仍具有岛弧玄武岩的特征。

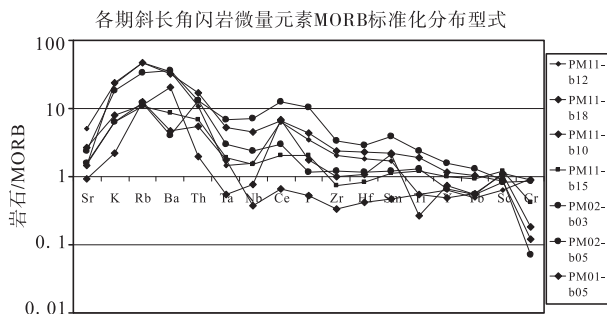


图 10 各期斜长角闪岩微量元素蛛网图

Fig. 10 Mantale-normalized trace element diagrams of each period amphibolite

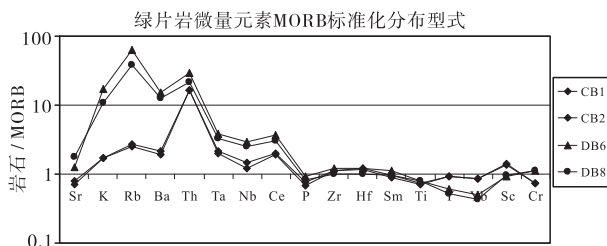


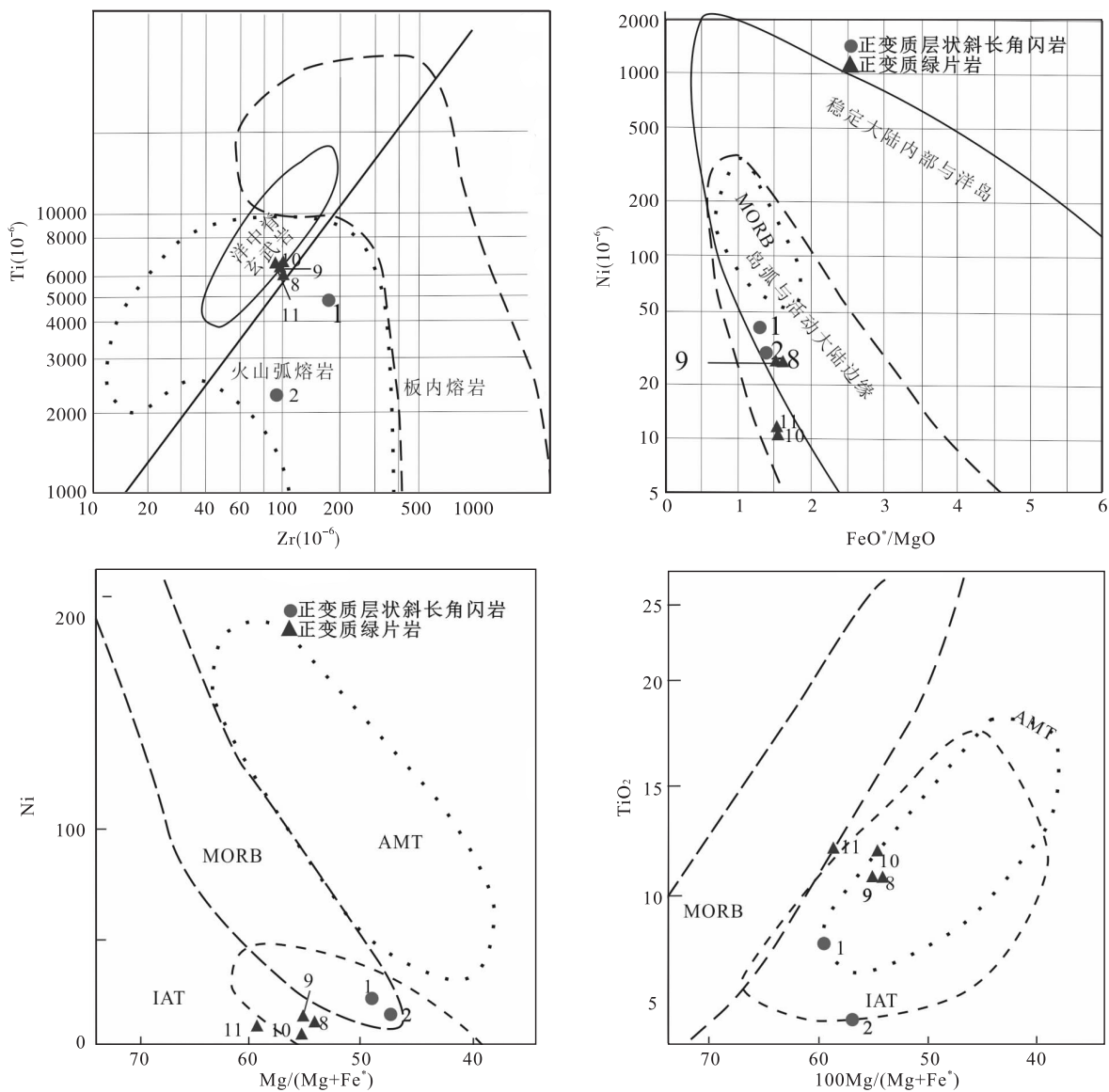
图 11 各期绿片岩微量元素蛛网图

Fig. 11 Mantale-normalized trace element diagrams of greenschist

在图 12a 中,层状正变质斜长角闪岩(1、2)落在火山弧熔岩区。而正变质绿片岩(8、9、10、11)和既落入火山弧熔岩区的也落入(10、11)或靠近(8、9)洋中脊玄武岩区。在图 12c 和 图 12d 中,正变质绿片岩(8、9、10、11)和层状正变质斜长角闪岩(1、2)均落入岛弧拉斑玄武岩区。个别处于岛弧拉斑玄武岩区近旁。在图 13b 中,所有投影点均落入岛弧和活动大陆边缘环境区。通过以上图解投影可以认为,层状正变质绿片岩和层状正变质斜长角闪岩均形成于岛弧或活动大陆边缘环境。

表 3 基性岩系列岩石微量元素分析结果 (10^{-6})

样号	时代	鉴定名称	投影 编号	Sr	K	Rb	Ba	Th	Ta	Nb	Ce	P	Zr	Hf	Sm	Ti	Y	Yb	Sc	Cr
PM11b12-2	I	钾长英混合 岩化黑云斜 长角闪岩	1	598.20	45 409.08	92.73	698.20	2.17	0.26	5.52	63.84	452.80	182.40	4.45	5.53	336.60	19	1.654 0	26	235.70
PM11b18-2	I	黑云斜长角闪岩	2	322.70	10 044.79	22.73	408.70	0.40	0.10	2.70	67.61	915.90	91.71	2.57	6.90	2 401.30	22	1.865 0	44	225.40
PM11b10	II	黑云斜长 角闪(片)岩	3	172.90	28 557.08	93.30	652.40	3.43	0.94	15.86	67.24	2 183.50	218.40	5.50	7.32	16 264.30	36	3.535 0	35	30.14
PM11b15	II	斜长角闪(片)岩	4	179.50	7 471.33	21.82	172.30	1.36	0.35	5.34	20.64	1 005.20	66.18	1.99	3.71	10 412.30	31	3.1130	48	104.00
PM02b03	III	含黝帘斜长角 闪片岩(正变质)	5	187.30	7 969.42	24.14	79.65	2.58	0.53	8.38	29.66	607.80	108.30	2.75	4.03	11 823.30	20	1.870 0	33	214.20
PM02b05	III	(绿泥石化黑云 绿帘)斜长角 闪片岩(正变质)	6	285.00	21 500.83	68.11	723.30	2.64	1.25	24.50	127.50	4 997.10	299.20	6.80	12.77	20 359.70	46	4.507 0	36	17.91
PM01b05	IV	片状(正) 斜长角闪岩	7	110.50	2 822.50	25.49	93.66	1.08	0.32	1.33	6.64	279.00	30.29	1.02	1.53	5 003.60	15	1.945 0	44	46.44
CB1	Pt _m	阳起片岩	8	84.37	1 992.35	5.11	38.79	3.34	0.38	5.05	20.21	377.30	101.10	2.90	3.19	6 032.00	28	2.875 0	54	180.80
CB2	Pt _m	阳起片岩	9	93.52	2 075.37	5.43	43.33	3.32	0.36	4.22	19.13	337.80	99.52	2.77	2.97	6 158.20	28	2.949 0	57	187.10
DB6	Pt _m	钠长阳起片岩/ 黑云石英片岩	10	152.50	19 425.46	124.00	309.50	5.79	0.68	10.09	37.11	447.80	107.00	2.94	3.76	6 580.700	18	1.7300	37	284.90
DB8	Pt _m	钠长阳起片岩	11	210.40	12 452.22	76.69	256.50	4.37	0.59	8.90	30.33	401.70	90.78	2.41	3.19	6 560.700 0	16	1.468 0	39	277.90
PM08b6	Pt _m	钙质钠长阳起片岩	12	178.30	7 554.34	36.79	358.30	3.48	0.59	10.86	58.74	959.60	150.60	3.89	6.42	9 683.00	24	2.128 0	30	51.28
PM08b7	Pt _m	千枚(纹层)状钙质 绿泥微晶片岩	13	193.30	12 452.22	78.65	399.30	3.49	0.62	10.96	46.31	916.30	159.00	4.04	4.85	9 962.40	22	1.922 0	30	34.09



AMT: 太古宙拉斑玄武岩; MORB: 洋中脊拉斑玄武岩; IAT: 岛弧拉斑玄武岩

图 12 (a) Ti - Zr 图解 (据 J. A. 皮尔斯, 1982) (b) Ni - FeO^*/MgO 图解 (据都城秋穗等, 1975)
(c) Ni - $100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^*)$ 图解 (d) $\text{TiO}_2 - 100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^*)$ 图解 (据吉尔等, 1979)

Fig. 12 (a) Ti - Zr diagram (After J. A. Pearce, 1982) (b) Ni - FeO^*/MgO diagram (After DUCHENG, 1975)
(c) Ni - $100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^*)$ diagram (d) $\text{TiO}_2 - 100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^*)$ diagram (After Gil, 1975)

3.5 稀土元素

第一期层状斜长角闪岩: $\sum \text{REE} = 151.48 \times 10^{-6}$
 $\sim 168.60 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{cn}} = 9.59 \sim 9.79$, $\text{Eu}/\text{Sm} = 0.23$ 。除 $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{cn}}$ 值较大外, 其他数据均未与岛弧玄武岩相异。蛛网图具有轻稀土富集特征及明显的 Eu 负异常 (这也可能与岩石经历了高级变质并经受混合岩化再造有关), 轻重稀土分异较明显的特征属于岛弧玄武 (SUN S S, 1989) (表 4)。

第二期脉状斜长角闪岩: $\sum \text{REE} = 20.04 \times 10^{-6}$
 $\sim 174.94 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{cn}} = 1.55 \sim 4.73$, $\text{Eu}/\text{Sm} = 0.28 \sim 0.33$ 。在球粒陨石标准化蛛网图 13 上表现为右向缓倾斜。与第一期斜长角闪岩对比具有较低的轻稀土正异常, 以及系统偏高于第一期的重稀土正异常。说明虽然也经历过角闪岩相的区域变质和少许混合岩化改造, 原岩受变质和混合岩化影响较小, 是一期独立的基性岩浆侵位。

表 4 基性变质岩稀土元素原始数据表(10^{-6})
Tab. 4 Rock analysis of trace elements(10^{-6}) of basic metamorphic rock

鉴定名称	时代	投影号	样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	(La/Lu) $\times$ cn	Σ REE	Eu/Sm
钾长英混合岩化 黑云斜长角闪岩	I	1	PM11-b12	28.06	63.84	7.61	30.34	5.53	1.28	5.70	0.66	3.64	0.68	1.92	0.26	1.65	0.30	19.27	28.06	63.84	7.61
	I	2	PM11-b18	31.39	67.61	8.32	35.04	6.90	1.57	6.78	0.83	4.53	0.84	2.30	0.29	1.87	0.33	21.99	31.39	67.61	8.32
黑云斜长角 闪(片)岩	II	3	PM11-b10	29.09	67.24	8.18	35.21	7.32	2.08	8.07	1.15	6.71	1.34	3.85	0.53	3.54	0.64	35.52	29.09	67.24	8.18
	II	4	PM11-b15	8.61	20.64	2.81	13.38	3.71	1.22	4.96	0.82	5.29	1.15	3.31	0.47	3.11	0.58	30.51	8.61	20.64	2.81
含黝帘斜长角闪 片岩(正变质)	III	5	PM02-b03	12.78	29.66	3.79	17.28	4.03	1.34	4.66	0.69	4.03	0.79	2.16	0.30	1.87	0.30	19.95	12.78	29.66	3.79
	III	6	PM02-b05	62.01	127.5	16.58	70.45	12.77	3.71	12.99	1.65	9.11	1.78	5.01	0.68	4.51	0.72	46.39	62.01	127.5	16.58
(绿泥石化黑云 绿帘)斜长角闪 片岩(正变质)	IV	7	PM01-b05	2.29	6.64	0.90	3.89	1.53	0.82	2.15	0.57	2.70	0.74	1.88	0.41	1.95	0.44	14.57	2.29	6.64	0.90
片状(正)斜长 角闪岩	Pt _{1m}	8	CB1	29.09	58.74	7.61	31.21	6.42	1.62	7.17	0.94	5.16	0.93	2.55	0.33	2.13	0.37	24.49	29.09	58.74	7.61
	Pt _{1m}	9	CB2	21.30	46.31	5.56	23.43	4.85	1.43	5.42	0.74	4.19	0.82	2.23	0.30	1.92	0.36	21.67	21.30	46.31	5.56
钠长阳起片岩/ 黑云石英片岩	Pt _{1m}	10	DB6	8.64	20.21	2.56	11.52	3.19	0.87	4.13	0.71	4.61	0.99	3.01	0.42	2.88	0.54	27.50	8.64	20.21	2.56
	Pt _{1m}	11	DB8	8.35	19.13	2.54	11.22	2.97	0.83	4.06	0.69	4.80	1.00	3.04	0.44	2.95	0.54	27.85	8.35	19.13	2.54
钙质钠长 阳起片岩	Pt _{1m}	12	PM08-b06	17.80	37.11	4.49	17.93	3.76	1.03	4.20	0.57	3.30	0.66	1.88	0.26	1.73	0.33	18.04	17.80	37.11	4.49
	Pt _{1m}	13	PM08-b07	13.94	30.33	3.58	14.66	3.19	0.95	3.47	0.50	2.92	0.59	1.65	0.23	1.47	0.28	15.78	13.94	30.33	3.58
干枚(纹层)状钙质 绿泥微晶片岩	Pt _{1m}	13	PM08-b07	13.94	30.33	3.58	14.66	3.19	0.95	3.47	0.50	2.92	0.59	1.65	0.23	1.47	0.28	15.78	13.94	30.33	3.58

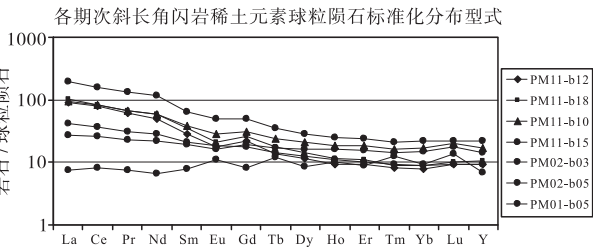


图 13 各期斜长角闪岩稀土元素球粒陨石标准化蛛网图

Fig. 13 Mantale-normalized trace element diagrams of each period amphibolite

第三期脉状斜长角闪岩 $\Sigma\text{REE}=83.68\times10^{-6}$
 $\sim329.46\times10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{cn}}=4.42\sim8.95$, $\text{Eu}/\text{Sm}=0.29\sim0.33$ 。在球粒陨石标准化蛛网图 13 上表现为变化幅度较大的右向缓倾斜。稀土总量变化很大,无明显的 Eu 负异常。据独特的分布形态,说明具独立的源区和演化过程(注:PM02b03 样品含蚀变注入碳酸盐长英值脉体,这也许是高稀土总量 $\Sigma\text{REE}=329.46\times10^{-6}$ 出现的原因)。

第四期脉状斜长角闪岩 $\Sigma\text{REE}=26.916\times10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{cn}}=0.54$, $\text{Eu}/\text{Sm}=0.54$ 。在球粒陨石标准化蛛网图上表现十分独特,为一总体水平的折线,应属单独成因无疑。从轻稀土相对较低,又具有 Eu 正异常看,岩浆成分未受围岩混染,表现为产生在板内张裂环境侵位环境。板内玄武岩则总体上显示“隆起”的特征,大多数元素比正常类型 MORB 富集(PEARCE J A, et al., 1983)。

绿片岩样品在球粒陨石标准化蛛网图 14 上表现 2 组曲线,这与岩矿鉴定结果一致。一组是 CB1、CB2,为无泥质夹层或混入物的阳起片岩;DB6、DB7 为或多或少具有泥质混入物的绿片岩,它们在球粒陨石标准化蛛网图 13 上表现各异。

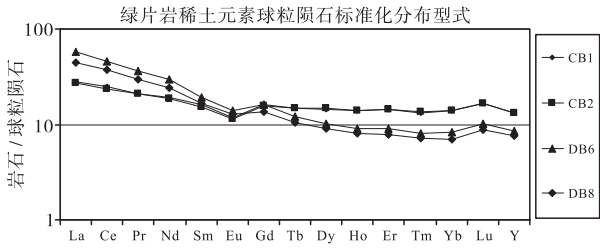


图 14 各期绿片岩稀土元素球粒陨石标准化蛛网图

Fig. 14 Mantale-normalized trace element diagrams of greenschist

CB1、CB2 样品具有: $\Sigma\text{REE}=62.57\times10^{-6}\sim64.27\times10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{cn}}=1.61\sim1.66$, $\text{Eu}/\text{Sm}=0.27\sim0.28$ 。在球粒陨石标准化蛛网图上表现为微右倾斜的轻稀土富集曲线,具 Eu 负异常和相对升高且较水平的重稀土折线,应属源区岩浆生成,其数据和图型均符合岛弧或弧后盆地环境。

DB6、DB7 样品具有: $\Sigma\text{REE}=77.76\times10^{-6}\sim95.04\times10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Lu})_{\text{cn}}=5.17\sim5.14$, $\text{Eu}/\text{Sm}=0.27\sim0.30$ 。在球粒陨石标准化蛛网图上表现为明显右倾斜的轻稀土富集曲线,具 Eu 负异常和相对低的重稀土折线,有可能是泥质混染所致。但从重稀土的含量普遍偏低,也不能排除是另一期不同源岩浆之喷发,但其数据和图型也符合岛弧或弧后盆地环境(表 4)。

4 热力学特征

由于各期斜长角闪岩的主要造岩矿物都是斜长石和角闪石,选用斜长石、角闪石共生矿物来计算各期斜长角闪岩所经历过变质作用的温度和压力。根据 HOLLAND et al., 1994 提出的角闪石-斜长石平衡温度计,通过角闪石端员组分活度/成分关系的分析(表 5、表 6、表 7),得出温度计公式。

表 5 基性岩系列岩石长石电子探针成分表(%)

Tab. 5 Electron microprobe composition of plagioclase from basic metamorphic rock(%)

氧化物	PM1-b5	PM1-b5	PM2-b5	PM10-b10	PM10-b20(6)	PM10-b20(7)	PM11-b18(1)	PM11-b18(2)	PM11-b18
SiO ₂	63.49	65.14	59.94	63.55	68.22	64.90	63.08	62.64	63.301
TiO ₂	0.00	0.04	0.00	0.00	0.14	0.05	0.03	0.01	0.00
Al ₂ O ₃	23.18	22.16	25.47	23.08	17.81	21.32	22.89	23.23	23.086
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.04	0.00	0.00
FeO	0.14	0.00	0.51	0.06	1.97	0.69	0.04	0.27	0.07
MgO	0.00	0.01	0.00	0.00	0	0.00	0.03	0.00	0.051
MnO	0.02	0.00	0.01	0.00	0.47	0.02	0.00	0.00	0.004
CaO	4.44	3.17	6.97	4.18	2.66	3.36	4.50	4.72	4.316
Na ₂ O	9.20	9.95	7.46	9.43	7.55	9.60	8.91	9.67	9.358
K ₂ O	0.07	0.04	0.08	0.15	1.23	0.07	0.16	0.10	0.166

表 6 基性岩系列岩石角闪石电子探针成分表(%)
Tab. 6 Electron microprobe composition of amphibole from basic metamorphic rock(%)

样号	PM1 - b5 (3)	PM1 - b5 (4)	PM2 - b5 (6)	PM2 - b5 (9)	PM10 - b10 (19)	PM10 - b10 (20)	PM10 - b20 (15)	PM10 - b20 (16)	PM11 - b18 (5)	PM11 - b18 (6)	PM11 - b18 (29)
期次	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
SiO ₂	45.27	44.85	48.44	40.41	42.86	45.20	39.52	40.22	45.92	46.46	45.91
TiO ₂	0.38	0.36	0.14	0.67	0.87	0.71	1.04	0.56	0.24	0.21	0.73
V ₂ O ₃	0.02	0.00	0.00	0.05	0.14	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.01	0.05	0.03	0.02
Al ₂ O ₃	13.51	13.24	8.35	14.35	10.94	8.96	12.54	12.81	8.49	8.58	8.93
FeO	16.64	16.42	16.11	21.63	21.56	20.61	22.05	23.16	16.27	16.06	15.51
NiO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
CoO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
MnO	0.15	0.08	0.25	0.32	0.34	0.32	0.41	0.45	0.25	0.26	0.09
MgO	9.48	8.91	11.69	6.02	7.00	7.79	6.63	6.09	11.71	11.99	12.17
BaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	10.80	11.40	11.18	11.47	11.29	11.58	11.42	11.75	11.79	12.19	11.67
Na ₂ O	1.41	1.38	0.90	1.49	1.48	1.02	1.20	1.35	1.20	1.16	1.33
K ₂ O	0.25	0.27	0.18	0.85	1.06	0.81	1.50	1.68	0.86	0.82	0.97
Total	97.89	96.91	97.24	97.31	97.65	97.24	96.35	98.08	96.76	97.76	97.47

表 7 基性变质岩斜长石-角闪石温压计计算结果表
Tab. 7 Calculation of temperature and pressure of plagioclase and hornblende in basic metamorphic rocks

样号	Si(mol/g)	Xipl	LnK	P(GP)	温度(℃)
PM01b05	6.952 3	0.566 8	0.468 3	0.730 3	559.389 2
	6.969 7	0.843 9	0.888 9	0.721 1	508.866 4
PM02b05	7.455 1	0.656 7	1.426 5	0.329 1	495.040 2
	6.516 1	0.656 7	0.107 5	0.851 3	593.024 5
PM10b10	6.877	0.795 8	0.712 4	0.567 3	548.718 2
	7.202 7	0.795 8	1.162 1	0.401 7	515.447 9
PM10b20	6.503 5	0.768 6	0.251 4	0.724 1	589.596 6
	6.533 9	0.834 5	0.366 2	0.733	572.616 9
PM11b18	7.208 6	0.774 4	1.144 1	0.352 9	523.111 1
	7.209 2	0.781 9	1.1547	0.357	521.439 9
	7.137 1	0.790 6	1.055 8	0.386	529.35

$$t = \frac{6.77p - 48.98 + Y}{-0.049 - 0.008314}k$$
$$= \frac{Si - 4}{8 - Si} \cdot x_{Ab}^{plg} p (\pm 0.06 \text{GPa})$$
$$= -0.301 + 0.476Altot \quad r2 = 0.99$$

第Ⅰ期混合岩化层状斜长角闪岩以 PM10 - b20(混合岩化黑云斜长角闪岩)及 PM11 - b18(弱混合岩化黑云斜长角闪岩)为代表。其中 PM10 - b20 测得压力为 0.72~0.73GPa,温度 572.62~589.60℃,代表早期高角闪岩相-麻粒岩相的变质条件;PM11b18(弱混合岩化黑云斜长角闪岩)测得压力为 0.35~0.39GPa,温度 521.44~529.35℃,代表乌拉山岩群又经受了角闪岩相复变质再造的温压条件。第Ⅱ期侵位于乌拉山岩群,偶见钾长英质注入的脉状斜长角闪岩 PM10 - b10(黑云斜长角闪岩)测得压力为 0.40~0.72GPa,温度 515.45~548.45℃,代表早期为角闪岩相,晚期向低角闪岩相退变的变质过程。第Ⅲ期侵位于色尔腾山岩群的脉状斜长角闪岩 PM02 - b05(绿泥石化黑云绿帘斜长角闪岩)测得核部压力为 0.85GPa,温度 593.02℃,代表脉岩结晶温压条件;而边部测得压力为 0.33GPa,温度 495.04℃,代表脉岩经历低角闪岩相变质作时的温压条件。第Ⅳ期侵位于渣尔泰山岩群的书记沟岩组的脉状斜长角闪岩 PM01 - b05(叠加变质斜长角闪岩)测得压力为 0.72~0.73GPa,温

度 508.87~559.39℃,代表了接触变质的绿帘角闪岩相或低角闪岩相的接触变质温压条件。而渣尔泰山岩群区域变质程度属典型的绿片岩相。

为了验证,现计算出六次配位与四次配位铝占位情况,并进行投图(图 15)。M10b20 为代表的第 I 期层状混合岩化斜长角闪岩的早期麻粒岩相或高角闪岩相区域变质温压力条件;以 PM11b18 为代表的第 I 期层状混合岩化斜长角闪岩的晚期角闪岩相复变质作用的温、压力条件。以 PM10b10 为代表的第 II 期脉状弱混合岩化斜长角闪岩的复变质作用的温压条件。早期投影点代表高角闪岩相区域变质(或残留岩浆结晶)的温度、压力条件;晚期投影点代表角闪岩相复变质的温度、压力条件;以 PM02b05 为代表的第 III 期斜长角闪岩,其上部投影点代表岩浆结晶的温压力条件,下部投影点代表叠加了绿帘角闪岩相区域变质的温压条件。以 PM01b05 投影点为代表的第 IV 期脉状斜长角闪岩属于叠加绿帘角闪岩相热接触变质的温压力条件。

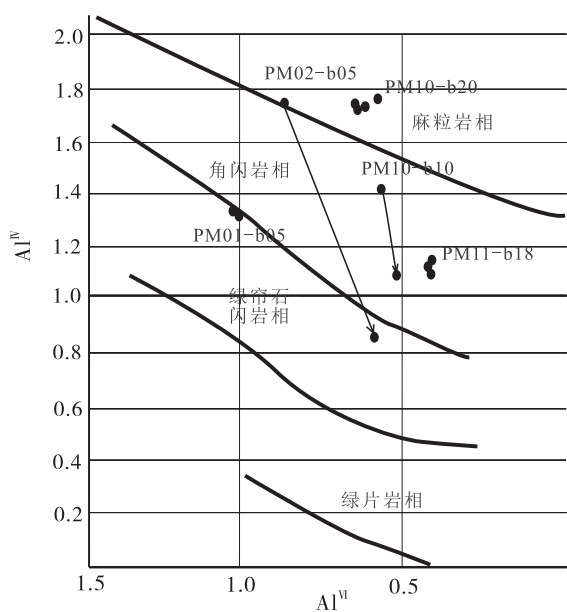


图 15 六次配位、四次配位铝占位图解 (GERYA et al., 1997)

Fig. 15 Occupation diagram of Six-order and Quartic coordinated aluminum (GERYA. et al, 1997)

关于绿片岩所处的温压计算未能直接获得。是利用美岱召岩组绿片岩中的细粒榴云片岩夹层的石榴石-黑云母计算的。求得变质作用温度为 414.79℃。其变质程度应属绿片岩相。若考虑到测区美岱

召岩群变质地体之中不时出现含硬绿泥石的云母石英片岩 (PM08b02; PM11b02), 所以判定测区美岱召岩群所经历的变质作用属于高绿片岩相区域变质作用。

5 演化历史

在中太古宙, 乌拉山美岱召岩群经历了高压绿片岩地区(也可能是异地形成后位移到此), 处于活动大陆外缘的岛弧环境, 发生了多期次基性火山喷发-碎屑以及碳酸盐岩沉积, 形成了厚度可观的一整套多期次的钙碱性拉斑玄武岩-火山碎屑岩喷发旋回, 最后以碳酸盐岩沉积而终结。此后, 经历了早期高角闪岩相(或麻粒岩相)和晚期角闪岩相 2 期区域变质, 2 期混合岩化改造, 以及多期次构造变形再造形成了形态复杂的多期次叠加褶皱, 属本区的构造基底。

新太古宙色尔腾山岩群当时的沉积环境相当于陆缘浅海较稳定的海相沉积, 形成了以石英岩为主的陆源碎屑沉积建造, 颇具稳定沉积盖层特征。其沉积基底也可能是已变质的乌拉山岩群(但未见直接接触或覆盖关系), 但更像是从异地因构造运动搬运而来的异地浅变质地体。后经历了绿帘角闪岩相(或低角闪岩相)区域变质改造及形态宽缓的褶皱变形。

古元古代在中太古宇乌拉山岩群变质地体和新太古宇色尔腾山岩群变质地体之间曾经存在过一海槽。在海槽闭合初期形成活动陆缘及岛弧型拉斑玄武岩-火山碎屑-陆源碎屑沉积。后再经俯冲闭合形成古元古界美岱召岩群变质地体。古元古界美岱召岩群经历了高压绿片岩相变质, 产状陡峻, 片理发育, 变形单一。也就是说古元古代之后, 由于构造挤压使美岱召岩群高压绿片岩地体成为中太古宇乌拉山岩群和新太古宇色尔腾山岩群 2 个古老变质地体的“黏合剂”。至此, 以上 3 个不同时代的变质地体共同作为测区古老变质基底。

而中元古代渣尔泰山岩群是测区古老变质基底之上第一层共有盖层沉积。是一套(含少量中酸性火山岩及火山碎屑)陆缘碎屑沉积建造; 原岩以含陆源碎屑岩、砂岩、碳质泥质粉砂岩、钙质黏土岩为主。

区域变质仅达到低绿片岩相。褶皱简单,变质地层多呈高角度单斜产出,应属测区盖层沉积。

此后,测区结束了区域变质,地壳活动以断裂构造为主。早期表现为压性叠瓦式俯冲(古生代之前),晚期表现为张性断裂(山前及内部中新生界断陷盆地)。

6 结论

(1)根据野外产状、变质程度和所处的地层时代,可将基性岩分为斜长角闪岩和绿片岩类。将斜长角闪岩划分为4期:层状斜长角闪岩类、早期岩脉状斜长角闪岩类、绿帘斜长角闪岩类、受接触变质的斜长角闪岩类。每一期斜长角闪岩都有特定的矿物共生组合,以及产状提供的信息也有所不同。

(2)基型变质岩的原岩恢复:通过对层状斜长角闪岩和层状绿片岩投图,发现除拉长角闪片岩、层纹状(含石墨、透辉石)拉长角闪片岩、钙质钠长阳起片岩、千枚(纹层)状钙质绿泥微晶片岩外原岩都为基性火山岩。

原岩系列的划分:通过 $Ol - Ne - Q$ 图解、 FeO^*/MgO 与 SiO_2 、 FeO^* 图解,判定乌拉山岩群层状正变质斜长角闪岩的原岩为拉斑玄武岩系列的钙碱性玄武岩;美岱召岩群正变质绿片岩均属亚碱性系列的拉斑玄武岩类。

(3)构造环境的判别:根据微量元素 N 型洋中脊(MORB)标准化蛛网图,第一期斜长角闪岩具有火山(岛)弧高钾钙碱性玄武岩的特点。其余3期斜长角闪岩具有板内和岛弧过渡的特点曲线及其成因特点。绿片岩中 CB1、CB2 具有相似的曲线,表现为洋中脊型和岛弧玄武岩的过渡特点,DB6、DB7 蛛网曲线仍具有岛弧玄武岩的特征。狼山地区层状正变质绿片岩和层状正变质斜长角闪岩均形成于岛弧或活动大陆边缘环境。各期基性岩稀土元素球粒陨石标准化蛛网图表明:第一期层状斜长角闪岩符合岛弧玄武岩的特征;第二期脉状斜长角闪岩原岩受变质和混合岩化影响较小,是一期独立的基性岩浆侵位;第三期脉状斜长角闪岩来自于不同的源区;第四期脉状斜长角闪岩表现为产生在板内张裂环境侵位环境;绿片岩中 CB1、CB2、DB6、DB7 样品其数据和

图型均符合岛弧或弧后盆地环境。

(4)各期斜长角闪岩的热力学特征:选用斜长石、角闪石共生矿物计算各期斜长角闪岩所经历过变质作用的温度和压力。第Ⅰ期混合岩化层状斜长角闪岩以压力为 $0.35 \sim 0.39 \text{ GPa}$;温度 $521.44 \sim 529.35^\circ\text{C}$ 为代表,证明乌拉山岩群又经受了角闪岩相复变质再造的温压条件。第Ⅱ期侵位于乌拉山岩群,偶见钾长英质注入的脉状斜长角闪岩,测得压力为 $0.40 \sim 0.72 \text{ GPa}$;温度 $515.45 \sim 548.45^\circ\text{C}$,代表早期为角闪岩相,晚期向低角闪岩相退变的变质过程。第Ⅲ期侵位于色尔腾山岩群的脉状斜长角闪岩测得核部压力为 0.85 GPa ;温度 593.02°C ,代表脉岩结晶温压条件;而边部测得压力为 0.33 GPa ;温度 495.04°C ,代表脉岩经历低角闪岩相变质作时的温压条件。第Ⅳ期侵位于渣尔泰山岩群的书记沟岩组的脉状斜长角闪岩 PM01 - b05 测得压力 $0.72 \sim 0.73 \text{ GPa}$;温度 $508.87 \sim 559.39^\circ\text{C}$,代表了接触变质的绿帘角闪岩相或低角闪岩相的接触变质温压条件。

参考文献(References):

- 王文龙,滕学建,刘洋,等. 内蒙古狼山乌和尔图花岗岩岩体锆石 U - Pb 年代学及地球化学特征[J]. 地质力学学报, 2017, 23(3):382-396.
- WANG Wenlong, TENG Xuejian, LIU Yang, et al. Zircon U - Pb chronology and geochemical characteristics of the wuheertu granite mass in langshan, inner mongolia[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(2):382-396.
- 张进,李锦轶,刘建峰,等. 内蒙古狼山西南地区枕状玄武岩 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年龄及意义[J]. 地质通报, 2013, 32(2-3):287-296.
- ZHANG Jin, LI Jinyi, LIU Jianfeng, et al. LA - ICP - MS U - Pb ages of pillow lava basalts in southwestern Langshan, Inner Mongolia and their implication[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(2-3): 287-296.
- 彭润民,翟裕生,王建平,等. 内蒙狼山新元古代酸性火山岩的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 2010, 55(26): 2611-2620.
- PENG Ruiming, ZHAI Yusheng, WANG Jianping et al. Discovery of Neoproterozoic acid volcanic rock in the

- south-western section of Langshan, Inner Mongolia[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(26):2611-2620.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1):1-4.
- PAN Guitang, XIAO Qinghui, LU Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 2009, 36(1):1-4.
- 王存智, 姜杨, 赵希林, 等. 陈蔡岩群下河图斜长角闪岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(3):425-442.
- WANG Cunzhi, JIANG Yang, ZHAO Xilin, et al. Geochronological and geochemical characteristics of the Xiahetu amphibolites from Chencai Group and their tectonic implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2016, 35(3):425-442.
- 周汉文, 李献华, 钟增球, 等. 豫西小秦岭地区太华杂岩中斜长角闪岩地球化学及其大地构造意义[J]. 地球化学, 1997, 26(2):87-100.
- ZHOU Hanwen, LI Xainhua, ZHONG Zengqiu, et al. Geochemistry of amphibolites within the taihua complex from the xiao qinling agea, western henan and its tectonic implication [J]. Geochemistry, 1997, 26(2):87-100.
- 蔡佳, 刘平华, 刘福来, 等. 大青山-乌拉山变质杂岩带石拐地区富铝片麻岩成因矿物学与变质演化[J]. 岩石学报, 2013, 29(2):437-461.
- CAI Jia, LIU Pinghua, LIU Fulai, et al. Genetic mineralogy and metamorphic evolution of Al-rich gneisses in the Shiguai area, Daqingshan-Wulashan metamorphic complex belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(2):437-461.
- 刘在铭, 邱鹏玉, 贾升霞. 东升庙地区乌拉山岩群地球化学特征分析[J]. 世界有色金属, 2016(13):94-98.
- LIU Zaiming, QIU Pengyu, JIA Shengxia, et al. Geochemical characteristics of the Wulashan rock group in Dongshenmiao area [J]. World Nonferrous Meta, 2016(13):94-98.
- 李伍平, 路凤香. 钙碱性火山岩构造背景的研究进展[J]. 地质科技情报, 1999, 18(2):15-18.
- LI Wuping, LU Fengxiang. New progress of the study of geologic setting for Cala-Alkithe volcanic rocks[J]. Geological Science and Technology Information, 1999, 18(2):15-18.
- 甘肃省第二地质矿产勘查院. 内蒙古乌拉特后旗东升庙等四幅 1:5 万区域矿产产地地址调查报告[R]. 2014.
- 王仁民. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京:地质出版社, 1987.
- WANG Renming. Diagrammatic discrimination of metamorphic rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- MCCULLOCH M T, GAMBLE J A. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 102(3-4):358-374.
- PEARCE J A, PEATE D W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 1995, 23:251-286.
- SUNS S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1):313-345.
- TOWS H, NEILSON M J, NEATHERY T L. Petrography, geochemistry, and tectonic significance of amphibolites of the Alabama Piedmont [J]. Am J Sci, 1984, 284:416-436.
- PEARCE J A. Role of the subcontinental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth C J et al. eds. Continental Basalts and Mantle Xenoliths. [s.l.]:[s.n.], 1983, 231-249.
- GERYATV, PERCHUK LL, TRIBOULET C, et al. Petrology of the Tumanshet Zonal Metamorphic Complex, Eastern Sayan [J]. Petrology, 1997, 5:503-533.
- HOLLAND TJB, BLUNDY J D. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1994, 116:433-447.