

doi: 10.12029/gc20190306

贺承广, 王世炎, 方怀宾, 柴建玉, 苏建仓, 常永伟, 王柳林, 陈登辉. 2019. 西昆仑塔什库尔干马尔洋岩组的厘定及控矿意义[J]. 中国地质, 46(3): 517-536.

He Chengguang, Wang Shiyan, Fang Huaibin, Chai Jianyu, Su Jiancang, Chang Yongwei, Wang Liulin, Chen Denghui. 2019. Redefinition and ore-forming significance of Maeryang Forming, Taxkorgan, Western Kunlun Mountains[J]. *Geology in China*, 46(3): 517-536(in Chinese with English abstract).

## 西昆仑塔什库尔干马尔洋岩组的厘定及控矿意义

贺承广<sup>1,2</sup>, 王世炎<sup>1,2</sup>, 方怀宾<sup>1,2</sup>, 柴建玉<sup>1,2</sup>, 苏建仓<sup>1,2</sup>, 常永伟<sup>1,2</sup>, 王柳林<sup>1,2</sup>, 陈登辉<sup>3</sup>

(1. 河南省地质调查院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 河南 郑州 450001; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:**塔什库尔干大型铁矿成矿带位于昆仑造山带西段, 原岩恢复表明该区含铁岩系主要为一套双峰式火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩建造组合, 岩石普遍遭受绿片岩相变质和多期构造变形。本文报道了在老井一带变安山岩中获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄值(603±10) Ma, 并结合前人年龄数据, 将原划古元古界布伦阔勒岩群的含铁岩系厘定为震旦系-寒武系组芬兰统马尔洋岩组(ZC<sub>1m</sub>), 其内发育典型的双峰式火山岩组合, 证实了区内震旦纪-早寒武世仍处于拉张伸展背景, 变质火山-沉积组合特征表明其形成于大陆边缘裂谷构造环境。含铁岩系典型的膏(钼)-铁建造很可能为元古代晚期“Marinoan 雪球”冰期后地球系统变化的火山-沉积响应。

**关键词:**西昆仑; 塔什库尔干; 含铁岩系; 马尔洋岩组; 震旦系-寒武系; 陆缘裂谷; Marinoan 雪球

**中图分类号:** P597.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2019)03-0517-20

## Redefinition and ore-forming significance of Maeryang Forming, Taxkorgan, Western Kunlun Mountains

HE Chengguang<sup>1,2</sup>, WANG Shiyan<sup>1,2</sup>, FANG Huaibin<sup>1,2</sup>, CHAI Jianyu<sup>1,2</sup>, SU Jiancang<sup>1,2</sup>,  
CHANG Yongwei<sup>1,2</sup>, WANG Liulin<sup>1,2</sup>, CHEN Denghui<sup>3</sup>

(1. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, Henan, China; 2. Henan Key Laboratory for Metal Mineral Ore-forming Geological Process and Utilization of Resource, Zhengzhou 450001, Henan, China; 3. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The Taxkorgan large-scale iron metallogenic belt is located in the western part of Kunlun orogenic belt. Research on metamorphic rocks shows that the protolith of the iron-bearing strata is a assemblage of bimodal volcanic rocks-clastic rocks-carbonate rocks formation. The strata have undergone widespread greenschist facies metamorphism and multi-superimposed deformation. The meta-andesite in Laobing area yielded an U-Pb zircon age of (603±10) Ma, suggesting that the eruption age of volcanic rocks is early Sinian. Combined with other age data available, the authors redefined the iron-bearing strata as “Sinian-Cambrian Terrenewian Maeryang Formation” (ZC<sub>1m</sub>), which doesn't belong to the previously defined “Paleoproterozoic

收稿日期: 2017-04-06; 改回日期: 2018-05-10

基金项目: 中国地质调查局“新疆 1:5 万干那汗达坂、马尔洋、皮下尼牙提幅区域地质调查”项目(12120114081801)资助。

作者简介: 贺承广, 男, 1985 年生, 硕士生, 工程师, 构造地质学专业, 主要从事区域地质调查和构造地质研究;

E-mail: 2692624526@qq.com。

Bulunkuole Group". The formation of the bimodal volcanic rocks proved that there was an extensional tectonic event in Taxkorgan area from Sinian to early Cambrian. Discrimination of tectonic setting on the metamorphic volcano-sedimentary formation indicates that the iron-bearing strata were formed in the continental margin rift. The gypsum (Ba)-iron formation was the volcano-sedimentary response to the changes of "Marinoan Snowball Earth" system after late Neoproterozoic glacial event.

**Key words:** Western Kunlun; Taxkorgan; iron-bearing strata; Maeryang Formation; bimodal volcanic rocks; Simian - Cambrian; margin rift; Marinoan Snowball

**About the first author:** HE Chengguang, male, born in 1985, engineer, master candidate, majors in structural geology, engages in the study of regional geological survey and structural geology; E-mail: 2692624526@qq.com.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey project (No. 12120114081801).

## 1 引 言

新疆塔什库尔干微陆块地处西昆仑造山带西段,是塔阿西—塔吐鲁沟铁铜钨成矿带的重要组成部分。1:25万区调工作新发现老并、乔普卡里莫(赞坎)和吉尔铁克等磁铁矿(王世炎等,2014),随后,又相继发现了叶里克、切列克其、莫喀尔等一批大中型磁铁矿床,其铁矿远景资源量>20亿t,构成塔什库尔干大型铁成矿带。与此同时,不同学者对含铁岩系的赋矿层位、成岩和成矿时代以及成矿模式等开展了较为深入的研究,并取得了一些宝贵的认识:1:25万区调工作将该套含铁岩系归为古元古界布伦阔勒岩群(Pt<sub>1</sub>B);乔耿彪等(2015)认为赞坎磁铁矿赋矿地层为布伦阔勒岩群,据相关年龄数据限定其时代为元古宙,属元古宙前寒武纪铁矿成矿事件的产物;董连慧等(2011a)、计文化等(2011)相继总结了布伦阔勒岩群铁矿的找矿前景及资源储量;刘建平等(2009)、胡建卫等(2010)、陈俊魁等(2011)、刘宇等(2011)和陈登辉等(2013)均认为其成因类型为沉积变质型铁矿;燕长海等(2012)在对老并、赞坎等4处矿床研究的基础上,首次提出“帕米尔式”铁矿床的概念,初步阐明该类铁矿床为一套典型的膏-铁建造,并据矿体顶板副变质岩的碎屑锆石U-Pb年龄(532±3.9)Ma和(526±5)Ma,将这套含铁岩系从布伦阔勒岩群中进行了初步解体,形成时代为早古生代;刘品德(2014)、张峭波(2016)对该套含铁岩系的成矿时代和膏-铁建造成因进行了研究,认为属海相火山沉积型铁矿。上述资料表明对于塔什库尔干地区含铁岩系的时代、构造属性和矿床成因等方面的认识还存在较大的争议,这也影响了对该地区铁矿成矿理论和找矿方向的判断。

笔者在塔什库尔干地区马尔洋一带进行1:5万区域地质调查时发现,该套含铁岩系在岩石组合、变质变形特征、含矿特征、构造背景及地质时代等方面与布伦阔勒岩群(Pt<sub>1</sub>B)均有较大的差异。原岩恢复工作表明该地层主要为一套双峰式火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩的火山-沉积建造组合。根据初步锆石U-Pb年代学的研究,将其解体并重新厘定马尔洋岩组,形成时代为震旦纪—早寒武世(ZC<sub>1</sub>m)。本文主要阐述该含铁岩系的岩石组合、地球化学和地层年代学特征,探讨其原岩类型、形成时代和矿床成因,以期研究西昆仑西段的早期构造演化和找矿层位提供基础地质资料。

## 2 地质概况

### 2.1 地质特征

研究区含铁岩系位于马尔洋—白尔力克达坂断裂与塔阿西—色克布拉克断裂带之间(图1),总体呈NW-SE向条带状展布,出露于塔什库尔干县马尔洋乡塔夏阿勒、问红、马尔洋一带,向西延伸至塔县河谷,被第四系覆盖,向东可延至马尔洋牧场一带,区内出露面积285 km<sup>2</sup>。NE、SW两侧分别与古元古界五古力牙特岩组、下志留统温泉沟组呈断层接触,并被中寒武世和渐新世两期花岗岩体侵入。主体由一套绿片岩相的变质岩组成,属总体无序、局部有序的构造岩石地层。综合前人研究成果与本次实测剖面(图2),依岩石组合自南而北将其划分为3个岩段。第一岩段为斜长黑云母石英片岩(局部含石榴子石)夹黑云透闪(石英)大理岩、黑云母斜长变粒岩组合,以发育黑云透闪(石英)大理岩为特征;第二岩段为斜长浅粒岩与(含磁铁矿)斜长角闪片岩不等厚互层(图3a),中间夹(含磁铁矿、硬

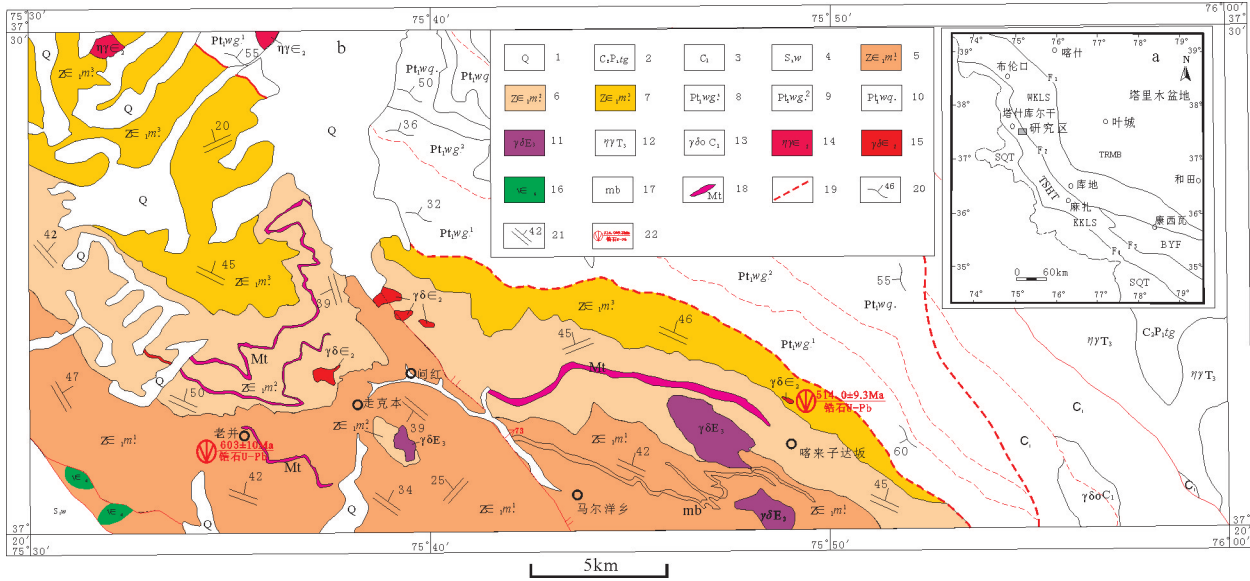


图1 西昆仑造山带及邻区构造单元划分及马尔洋一带地质简图

a—西昆仑地区构造单元划分图;b—研究区地质概况

a: TRMB—塔里木板块; WKLS—西昆仑造山带; KKLS—喀喇昆仑造山带; TSHT—甜水海地块; BYF—巴颜喀拉褶皱带; SQT—羌塘地块; F<sub>1</sub>—公格尔—柯岗断裂; F<sub>2</sub>—康西瓦—鲸鱼湖断裂; F<sub>3</sub>—大红柳滩断裂; F<sub>4</sub>—喀喇昆仑断裂; b: 1—第四系; 2—上石炭统一二叠统特给乃奇克达坂组; 3—下石炭统; 4—下志留统温泉沟组; 5—震旦系—寒武系组芬兰统马尔洋岩组第三岩段; 6—震旦系—寒武系组芬兰统马尔洋岩组第二岩段; 7—震旦系—寒武系组芬兰统马尔洋岩组第一岩段; 8—古元古界五古力牙特岩组第一岩段; 9—古元古界五古力牙特岩组第二岩段; 10—古元古界瓦恰岩组; 11—渐新世花岗岩闪长岩; 12—晚三叠世二长花岗岩; 13—早石炭世英云闪长岩; 14—寒武纪第二世二长花岗岩; 15—寒武纪第二世花岗岩闪长岩; 16—寒武统芙蓉世辉长岩; 17—大理岩; 18—磁铁矿层; 19—韧性断层; 20—片麻理; 21—片理; 22—锆石年龄

Fig.1 Tectonic units and geological sketch map of Maeryang in western Kunlun orogenic belt

a—Division of tectonic units in the western Kunlun orogenic belt; b—Geological sketch map of Maeryang

a: TRMB—Tarim plate; WKLS—western Kunlun orogenic belt; KKLS—Karakorun orogenic belt; TSHT—Tianshuihai terrane; BYF—Bayankela fault-folded belt; SQT—Qiangtang terrane; F<sub>1</sub>—Kongur—Kegang fault; F<sub>2</sub>—Kangkir—Jingyuhu fault; F<sub>3</sub>—Dahongliutan fault; F<sub>4</sub>—Karakorun fault; b: 1—Quaternary; 2—Upper Carboniferous—Lower Permian Tegeinaikikedaban Formation; 3—Lower Carboniferous; 4—Lower Silurian Wenquangou Formation; 5—Sinian—Cambrian Terreneuvian Maeryang Formation 3rd lithologic member; 6—Sinian—Cambrian Terreneuvian Maeryang Formation 2nd lithologic member; 7—Sinian—Cambrian Terreneuvian Maeryang Formation 1st lithologic member; 8—Paleoproterozoic Wuguliyate Formation 1st lithologic member; 9—Paleoproterozoic Wuguliyate Formation 2nd lithologic member; 10—Paleoproterozoic Waqia Formation; 11—Oligocene granodiorite; 12—Late Triassic monzogranite; 13—Early Carboniferous plagiogranite; 14—Cambrian series 2 Monzogranite; 15—Cambrian series 2 granodiorite; 16—Cambrian Furongian gabbro; 17—Marble; 18—Magnetite ore; 19—Ductile fault; 20—Gneissosity; 21—Schistosity; 22—Age of zircon

石膏)黑云斜长变粒岩、大理岩组合,以发育硬石膏磁铁矿和斜长角闪磁铁矿为特征,是区内磁铁矿的主要赋矿层位,自下而上(含磁铁矿)斜长角闪片岩有变厚之趋势。第三岩段为(含石榴石、透闪石)钠长二云母石英片岩、黑云斜长变粒岩夹斜长角闪片岩组合。各岩性段之间为构造协和接触,但未见顶和底。

该套含铁岩系遭受多期构造变形叠加,总体呈一轴面近NW向的大型紧闭同斜—平卧褶皱(图3b),局部叠加后期斜歪倾伏褶皱和浅层次NWW向—近EW向断裂。早期平卧褶皱形成区域透入性轴面面理(S<sub>1</sub>),沿面理发育长英质变质分异脉体;中期

以早期面理(S<sub>1</sub>)为变形面,发育一系列斜歪倾伏褶皱,轴面总体走向NWW,倾向NNE,并形成现今透入性区域性面理(S<sub>2</sub>);晚期则以浅层次NWW向—近EW向断裂发育为主,并不同程度地造早期褶皱形态。由于受多期次不同构造层次作用影响,其原始层序已被不同程度的改造置换。

### 2.2 岩石类型

区内含铁岩系岩石类型主要为长英质片岩类、长英质变粒岩类、大理岩类、角闪岩类和硬石膏岩类等。

(1)长英质片岩类:空间上层状展布,有大理岩、石英岩、角闪岩类夹层相伴产出,主要产出于第一、三岩段。岩石类型为黑云母石英片岩、(含钙质)斜长黑



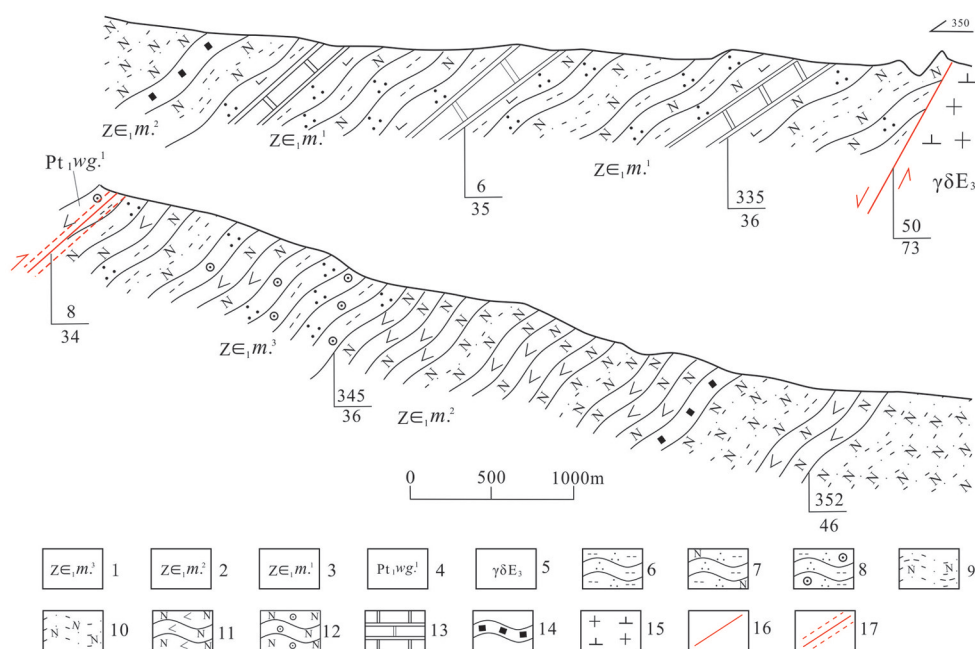


图2 马尔洋一带含铁岩系地质剖面图

1—震旦系—寒武系组芬兰统马尔洋岩组一岩段;2—震旦系—寒武系组芬兰统马尔洋岩组二岩段;3—震旦系—寒武系组芬兰统马尔洋岩组三岩段;4—古元古界五古力牙特岩组一岩段;5—渐新世花岗岩闪长岩;6—黑云石英片岩;7—斜长黑云石英片岩;8—石榴黑云石英片岩;9—黑云斜长变粒岩;10—斜长浅粒岩;11—斜长角闪片岩;12—榴闪岩;13—大理岩;14—磁铁矿层;15—中粗粒花岗岩闪长岩;16—脆性断层;17—脆韧性断层

Fig. 2 Geological section of iron-bearing strata in Maeryang area

1—Sinian-Cambrian Terreneuvian Maeryang Formation 1st lithologic member; 2—Sinian-Cambrian Terreneuvian Maeryang Formation 2nd lithologic member; 3—Sinian-Cambrian Terreneuvian Maeryang Formation 3rd lithologic member; 4—Paleoproterozoic Wuguliyate Formation 1st lithologic member; 5—Oligocene granodiorite; 6—Biotite quartz schist; 7—Plagioclase biotite quartz schist; 8—Garnet biotite quartz schist; 9—Biotite plagioclase leptinite; 10—Plagioclase leptite; 11—Amphibolite schist; 12—Garnet Amphibolite; 13—Marble; 14—Magnetite ore; 15—Medium coarse-grained granodiorite; 16—Brittle fault; 17—Ductile fault

云石英片岩、(含石榴子石)钠长二云母石英片岩和黑云母片岩等。主要由石英(35%~60%)、斜长石(5%~30%)、黑云母(20%~60%)、白云母(12%~18%)及少量方解石(0~8%)、石榴石(0~5%)组成。

(2)长英质变粒岩:岩石普遍遭受后期构造变形,定向构造发育,局部表现为韧性剪切变形。空间上层状展布,主要产于第二岩段,第一、三岩段少量分布,与斜长角闪片岩多呈不等厚互层产出,厚度比1:1~3:1,局部发育大理岩、片岩夹层。岩石类型主要为黑云斜长变粒岩、阳起斜长浅粒岩,矿物成分为斜长石(35%~70%)、钾长石(5%)、石英(10%~24%)、黑云母(5%~25%)、阳起石(0~8%)和磁铁矿、磷灰石微量组成,粒状矿物主要以自形一半自形斜长石为主(图3c,d),石英多呈细粒他形分布与斜长石之间,局部可见斜长石斑晶残留(图3e)。

(3)斜长阳起片岩:主要集中产于第二、三岩段,

与斜长浅粒岩、黑云斜长变粒岩及片岩等岩类不等厚互层产出。矿物成分为斜长石(15%~35%)、阳起石(40%~70%)、磁铁矿(5%~8%)、石英(<5%)和黑云母少量组成。

(4)大理岩类:呈层状产于片岩、长英质粒岩之中,局部含磁铁矿。岩石类型分别为含斜长(黑云母)透闪大理岩、含石英透闪大理岩、石英大理岩、磁铁大理岩等。岩石条带状构造发育,由方解石(55%~80%)、透闪石(10%~18%)、黑云母(5%~10%)、石英(0~8%)和磁铁矿(0~15%)组成。

(5)硬石膏磁铁矿:主要产于第二岩段的斜长角闪片岩、长英质变粒岩内,第一岩段少量分布。以浸染状构造为主(图3f),局部条带状,品位变化较大。矿石矿物以磁铁矿(15%~30%)为主,早世代磁铁矿占主体,自形一半自形粒状(0.01~0.5 mm),系原始沉积成因;晚世代磁铁矿含量较少,沿早世代

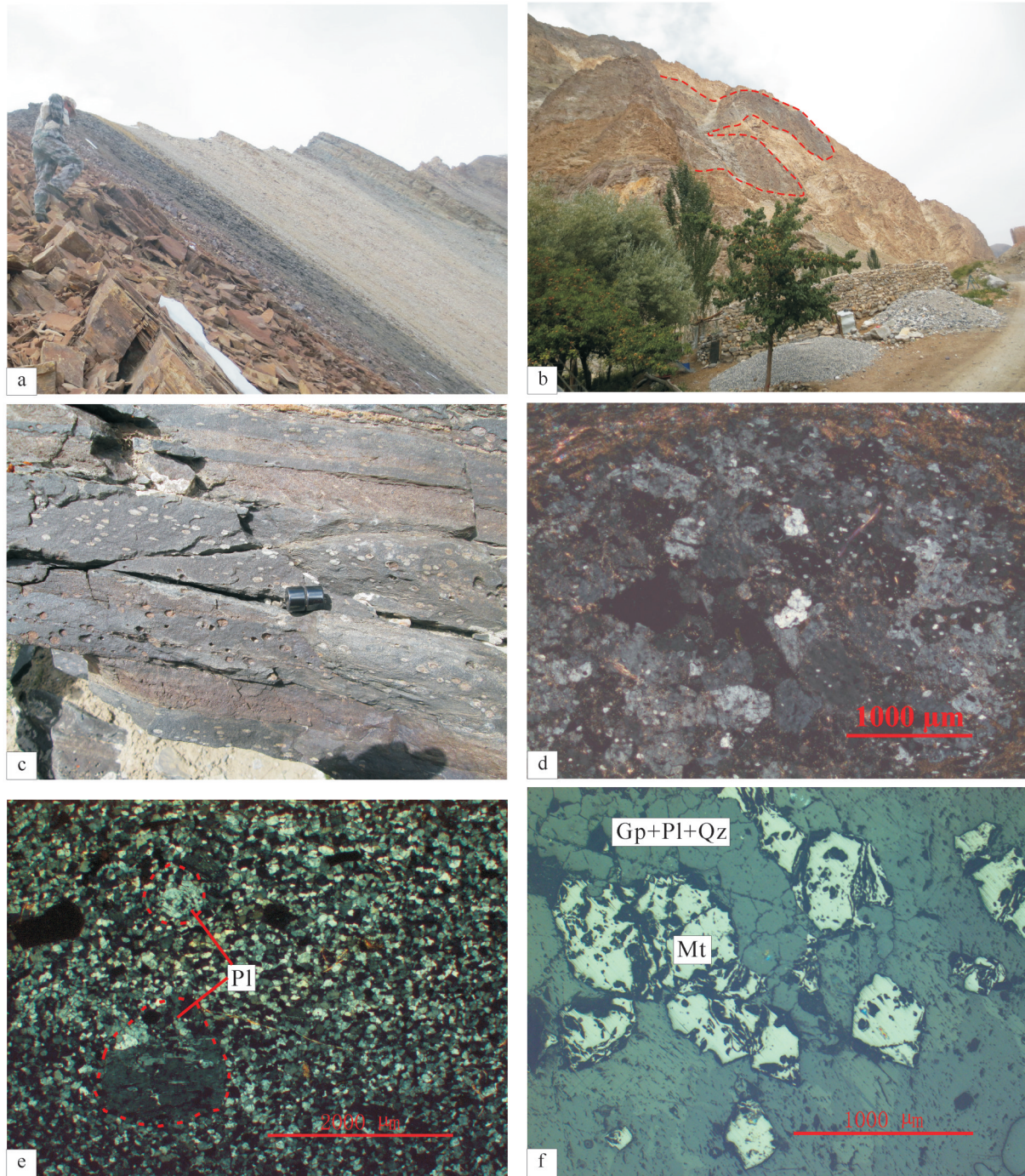


图3 马尔洋一带含铁岩系野外和镜下特征

a—斜长角闪片岩与浅粒岩互层产出特征;b—大理岩平卧褶皱露头特征;c, d—变安山岩露头及镜下特征;e—斜长浅粒岩中斜长残余斑晶镜下特征;f—石膏磁铁矿;Gp—石膏;Pl—斜长石;Mt—硫铁矿;Qz—石英

Fig. 3 Field and microscopic features of iron-bearing strata in Maeryang area

a—Interbedded amphibolite schist and leptite; b—Recumbent fold of marble; c, d—Outcrop and microscopic features of meta-andesite; e—Microphotograph of plagioclase phenocryst from Plagioclase leptite; f—Microphotograph of gypsum-iron formation; Gp—Gypsum; Pl—Pagioclase; Mt—Magnetite; Qz—Qzartz



磁铁矿边缘分布。黄铁矿和磁黄铁矿少量,他形分布于磁铁矿颗粒之间。脉石矿物以硬石膏(40%~60%)为主,半自形—他形粒状,呈浸染状产出。

### 3 样品测试结果

#### 3.1 分析测试方法

本文将实测剖面所取得的12件样品进行岩石地球化学分析,其中长英质片岩类4件、角闪岩类3件、长英质粒岩5件,并对原岩为安山岩的长英质粒岩进行锆石U-Pb定年。

岩石地球化学分析测试由国土资源部武汉矿产资源监督检测中心完成,将岩石样品破碎、研磨至200目制成分析样品,主量元素分析方法为X-荧光光谱法(XRF),分析误差1%~3%。微量元素(含稀土元素)分析方法为等离子质谱(ICP-MS),分析准确度优于5%。

本次同位素地质年代学研究所用样品的锆石挑选由河北省廊坊岩拓地质服务有限公司完成。锆石样品经常规的粉碎、磁选和重选,然后在双目镜下挑选晶形完好的锆石颗粒。锆石制靶与阴极发光(CL)照相在北京锆年领航科技有限公司进行,将挑选的晶形完好的锆石颗粒与标准锆石TEM一起黏贴在环氧树脂中,抛光后制成样靶。锆石LA-ICP-MS U-Pb定年在中科院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。电感耦合等离子体质谱由日本安捷伦公司制造,型号为Agilent 7700x,激光剥蚀系统由德国Lamda Physik公司制造,型号为GeoLasPro。ArF准分子激光发生器产生193 nm深紫外光束,经匀化光路聚焦于锆石表面,激光束斑直径为32 μm,能量密度为10 J/cm<sup>2</sup>,剥蚀频率为5 Hz,共计40 s,剥蚀颗粒物被氦气送入质谱仪中完成测试。测试过程中以标准锆石91500为外标校正元素分馏,以标准锆石GJ-1与Plešovice作为盲样监控数据质量,以NIST SRM 610为外标,以Si为内标测定锆石中的Pb元素含量,以Zr为内标测定其余微量元素含量,各样品的加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用Isoplot3.0。

#### 3.2 岩石地球化学特征

##### 3.2.1 主量元素

马尔洋岩组主要化学组成分析结果见表1。

长英质片岩类(样品102/7、108/48、173/14和

187/74)SiO<sub>2</sub>含量为63.63%~76.92%,平均含量68.18%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为10.62%~15.64%,平均含量13.96%;TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=2.36%~6.81%,平均含量5.00%;MgO=1.25%~3.04%,平均含量2.09%;CaO=1.20%~2.89%,平均含量2.35%;MnO=0.02%~0.41%,Na<sub>2</sub>O=2.54%~3.67%,K<sub>2</sub>O=2.20%~4.28%,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O总体=0.59~1.30,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0.16%~0.21%。

斜长角闪片岩(样品111/78、116/119、187/78)SiO<sub>2</sub>含量为51.24%~55.09%,平均含量52.85%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为14.28%~16.44%,平均含量15.24%;TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=9.39%~13.05%,平均含量10.93%;MgO=3.85%~6.58%,具有一定的波动,平均含量5.48%;CaO=4.25%~7.82%,平均含量6.25%;TiO<sub>2</sub>含量为1.09%~1.61%,平均含量1.43%;MnO=0.10%~0.19%,Na<sub>2</sub>O=3.23%~4.07%,K<sub>2</sub>O=1.08%~3.09%,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O=1.05~3.14,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0.22%~0.28%。

黑云斜长变粒岩(样品2026/1)因含有较多的石英杏仁体,其化学分析结果仅具参考意义,其余长英质粒岩(样品110/65、125/34、127/45、129/60)SiO<sub>2</sub>含量为69.16%~74.14%,平均含量72.35%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为13.11%~14.30%,平均含量13.57%;TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=2.40%~4.60%,平均含量3.53%;MgO=0.87%~2.05%,平均含量1.25%;CaO=0.39%~2.47%,平均含量1.60%;MnO=0.03%~0.07%,Na<sub>2</sub>O=4.44%~6.66%,K<sub>2</sub>O=0.13%~0.84%,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O=5.29~51.23(远大于1),P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0.02%~0.10%。

综上所述可以看出,三种变质岩石类型表现出截然不同的地球化学组成。其中长英质片岩与岩屑砂岩、杂砂岩、长石砂岩的SiO<sub>2</sub>含量比较接近(分别为66.1%、68.3%和77.1%),与典型石英砂岩差别较大(SiO<sub>2</sub>含量为95.4%);Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量相对岩屑砂岩、长石砂岩则明显偏高(分别为8.7%和8.1%),与杂砂岩较为接近(13.5%);Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O值指示为相对富钾型(田景春等,2016)。长英质粒岩(除样品2026/1)SiO<sub>2</sub>含量介于杂砂岩与长石砂岩之间,但Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量明显偏高,且Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O值远大于1,从而显示非沉积岩的特征。斜长角闪片岩SiO<sub>2</sub>含量可与中基性岩浆岩相对比,TiO<sub>2</sub>含量略大于洋中脊玄武岩(TiO<sub>2</sub>含量为1.28%),Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量接近于洋中脊玄武岩(15.45%),Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O值(略大于1)则显示了岛弧高钾钙碱性玄武岩的特征(徐夕生等,2010)。

表1 马尔洋岩组变质岩主量元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果Table 1 Major elements (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) compositions of metamorphic rocks in the Maeryang Formation

| 岩性                             | 斜长黑云石英片岩 |        |        | 黑云石英片岩 | 斜长角闪片岩 |         |        | 黑云斜长变粒岩 | 斜长浅粒岩  |        |        |        |
|--------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 样号                             | 102/7    | 108/48 | 173/14 | 187/74 | 111/78 | 116/119 | 187/78 | 2026/1  | 110/65 | 125/34 | 127/45 | 129/60 |
| SiO <sub>2</sub>               |          |        |        | 67.79  |        |         |        | 63.87   | 74.14  | 72.69  | 73.41  | 69.16  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.69     | 0.79   | 0.55   | 0.73   | 1.09   | 1.58    | 1.61   | 0.73    | 0.37   | 0.4    | 0.37   | 0.53   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.64    | 14.91  | 10.62  | 14.25  | 14.28  | 16.44   | 15     | 14.51   | 13.67  | 13.11  | 13.21  | 14.3   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.58     | 3.84   | 1.18   | 0.63   | 2.99   | 2.4     | 3.64   | 0.71    | 0.86   | 2.95   | 2.36   | 1.77   |
| FeO                            | 3.6      | 2.7    | 1.07   | 4      | 6.7    | 6.35    | 8.55   | 6.25    | 1.4    | 1.5    | 1.03   | 1.7    |
| MnO                            | 0.04     | 0.41   | 0.02   | 0.06   | 0.19   | 0.17    | 0.1    | 0.07    | 0.04   | 0.04   | 0.03   | 0.07   |
| MgO                            | 3.04     | 1.25   | 1.38   | 2.68   | 6.03   | 3.85    | 6.58   | 2.56    | 0.98   | 0.87   | 1.08   | 2.05   |
| CaO                            | 2.89     | 2.86   | 1.2    | 2.46   | 6.67   | 7.82    | 4.25   | 2.21    | 2.16   | 1.38   | 0.39   | 2.47   |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.67     | 2.54   | 2.92   | 3.52   | 3.23   | 3.39    | 4.07   | 2.03    | 4.44   | 5.9    | 6.63   | 6.66   |
| K <sub>2</sub> O               | 2.82     | 4.28   | 2.41   | 2.2    | 3.09   | 1.08    | 2.86   | 4.9     | 0.84   | 0.22   | 0.16   | 0.13   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.16     | 0.21   | 0.19   | 0.19   | 0.22   | 0.28    | 0.25   | 0.22    | 0.08   | 0.1    | 0.07   | 0.02   |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 1.4      | 1.39   | 1.09   | 1.23   | 1.37   | 1.23    | 1.61   | 1.17    | 0.65   | 0.48   | 0.88   | 0.63   |
| CO <sub>2</sub>                | 0.56     | 0.05   | 0.29   | 0.06   | 1.61   | 0.1     | 0.06   | 0.37    | 0.16   | 0.14   | 0.08   | 0.34   |
| LOI                            | 1.59     | 1.22   | 1.26   | 0.86   | 2.32   | 0.66    | 0.74   | 0.88    | 0.72   | 0.54   | 1.04   | 0.82   |
| Total                          | 99.36    | 99.42  | 99.71  | 99.37  | 99.03  | 99.1    | 98.86  | 98.94   | 99.69  | 99.71  | 99.78  | 99.69  |
| Rb                             | 131.1    | 112.5  | 72.08  | 99.51  | 49.97  | 22.55   | 106.95 | 181.7   | 18.79  | 3.42   | 1.71   | 1.09   |
| Sr                             | 152.25   | 123.2  | 86.9   | 269.47 | 287.25 | 362.1   | 134.6  | 94.07   | 190.25 | 57.48  | 22.13  | 52.17  |
| Ba                             | 1002.4   | 1408.2 | 587.9  | 433.4  | 665.4  | 244.6   | 427.5  | 1958    | 226.3  | 87.1   | 9.2    | 18.53  |
| Th                             | 4.84     | 3.34   | 5.41   | 13.06  | 4.41   | 3.23    | 2.47   | 11.23   | 3.45   | 6.03   | 5.58   | 6.36   |
| U                              | 0.48     | 1.74   | 0.86   | 2.64   | 0.42   | 0.86    | 0.83   | 1.77    | 0.9    | 0.53   | 0.64   | 0.64   |
| Nb                             | 12.61    | 4.62   | 9.22   | 10.86  | 7.84   | 7.79    | 6.31   | 9.54    | 2.66   | 6.02   | 3.59   | 4.9    |
| Ta                             | 0.69     | 0.38   | 0.54   | 1.24   | 0.45   | 0.93    | 0.55   | 0.65    | 0.13   | 0.39   | 0.29   | 0.48   |
| Zr                             | 113.4    | 121.8  | 284.7  | 194.78 | 124.7  | 130.9   | 141.62 | 179.1   | 184    | 144.4  | 155.8  | 143.9  |
| Hf                             | 3.38     | 2.76   | 7.22   | 4.65   | 3.12   | 3.83    | 2.99   | 4.1     | 4.81   | 4.63   | 4.72   | 4.18   |
| Ni                             | 52.21    | 6.29   | 12.43  | 34.27  | 16.9   | 13.23   | 32.37  | 65.4    | 2.31   | 2.75   | 2.55   | 1.84   |
| Co                             | 8.21     | 59.36  |        |        | 16.41  | 24.68   |        | 15.79   | 3.23   | 3.28   | 1.46   | 3.37   |
| Cr                             | 71.97    | 7.12   | 23.95  | 59.63  | 44.13  | 50.45   | 57.81  | 94.97   | 3.36   | 7.63   | 9.71   | 7.36   |
| V                              | 99.77    | 128.34 | 49.51  | 94.09  | 201.2  | 218.36  | 244.86 | 154.6   | 41.47  | 63.64  | 46.23  | 95.31  |
| Sc                             | 13.29    | 19.89  | 5.91   | 14.59  | 23.33  | 24.26   | 40.92  | 15.08   | 12.2   | 14.59  | 11.34  | 20.77  |
| Cs                             | 5.85     | 2.35   | 1.86   | 3.43   | 1.96   | 0.75    | 2.53   | 7.42    | 0.29   | 0.23   | 1.19   | 0.05   |
| La                             | 12.49    | 17.79  | 20.82  | 36.74  | 19.78  | 19.14   | 16.62  | 24.6    | 14.71  | 14.08  | 16.72  | 15.55  |
| Ce                             | 23.93    | 40.02  | 38.14  | 70.74  | 40.07  | 39.67   | 31.11  | 54.7    | 27.88  | 25.67  | 28.85  | 28.77  |
| Pr                             | 2.95     | 5.52   | 4.59   | 8.16   | 5.17   | 5.46    | 4.21   | 7.54    | 3.59   | 3.62   | 3.65   | 3.78   |
| Nd                             | 10.87    | 22.88  | 18.17  | 32.31  | 20.06  | 22.53   | 19.38  | 29.01   | 13.75  | 15.07  | 13.2   | 15.54  |
| Sm                             | 2.25     | 5.58   | 4.06   | 6.65   | 4.5    | 5.51    | 5.45   | 6.06    | 3.16   | 4.17   | 2.46   | 4.18   |
| Eu                             | 0.59     | 1.53   | 1.19   | 1.49   | 1.18   | 1.69    | 1.95   | 1.28    | 0.92   | 0.95   | 0.45   | 0.82   |
| Gd                             | 2.17     | 6.07   | 4.68   | 6.71   | 4.4    | 5.56    | 6.49   | 5.41    | 3.16   | 4.29   | 2.22   | 4.29   |
| Tb                             | 0.33     | 1.01   | 0.76   | 0.92   | 0.73   | 0.94    | 1.13   | 0.85    | 0.52   | 0.79   | 0.4    | 0.74   |
| Dy                             | 1.94     | 6      | 4.61   | 4.55   | 4.62   | 5.82    | 7      | 4.68    | 3.01   | 5.42   | 2.64   | 4.63   |
| Ho                             | 0.38     | 1.18   | 1.01   | 0.87   | 0.96   | 1.16    | 1.55   | 0.9     | 0.58   | 1.16   | 0.58   | 0.96   |
| Er                             | 1.04     | 3.15   | 2.75   | 2.37   | 2.78   | 3.22    | 4.39   | 2.29    | 1.61   | 3.5    | 1.73   | 2.77   |
| Tm                             | 0.14     | 0.44   | 0.42   | 0.37   | 0.43   | 0.48    | 0.68   | 0.31    | 0.23   | 0.59   | 0.27   | 0.43   |
| Yb                             | 0.79     | 2.56   | 2.61   | 2.5    | 2.64   | 2.92    | 4.42   | 1.66    | 1.37   | 3.6    | 1.69   | 2.60   |
| Lu                             | 0.11     | 0.41   | 0.37   | 0.39   | 0.42   | 0.46    | 0.66   | 0.22    | 0.21   | 0.58   | 0.26   | 0.42   |
| Y                              | 9.83     | 34.12  | 26.08  | 22.22  | 24.79  | 30.98   | 40.36  | 24.41   | 16.15  | 33.61  | 16.7   | 27.31  |
| ∑REE                           | 59.98    | 114.14 | 104.18 | 174.77 | 107.74 | 114.56  | 105.04 | 139.51  | 74.7   | 83.49  | 75.12  | 85.48  |
| (La/Yb) <sub>N</sub>           | 10.66    | 4.69   | 5.38   | 9.91   | 5.05   | 4.42    | 2.54   | 9.99    | 7.24   | 2.64   | 6.67   | 4.03   |
| δEu                            | 0.81     | 0.8    | 0.83   | 0.68   | 0.8    | 0.92    | 1      | 0.81    | 0.88   | 0.68   | 0.58   | 0.59   |
| δCe                            | 0.92     | 0.97   | 0.9    | 0.94   | 0.93   | 0.92    | 0.87   | 0.92    | 0.9    | 0.85   | 0.85   | 0.88   |

### 3.2.2 稀土元素

由于该套地层变质程度达绿片岩相,且变形强烈,因此开展稀土元素和微量元素的分析对其原岩类型具有重要的指示意义,马尔洋岩组变质岩的稀土元素分析数据见表1。

(斜长)黑云石英片岩稀土总量差异较大, $\Sigma$ REE=59.98 $\times 10^{-6}$ ~174.77 $\times 10^{-6}$ ,平均值为113.27 $\times 10^{-6}$ ,变化于大洋岛弧杂砂岩值((58 $\pm$ 10) $\times 10^{-6}$ )与大陆岛弧杂砂岩值((146 $\pm$ 20) $\times 10^{-6}$ )之间;轻、重稀土元素含量分别为53.08 $\times 10^{-6}$ ~156.09 $\times 10^{-6}$ 和6.79 $\times 10^{-6}$ ~18.29 $\times 10^{-6}$ , $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE=4.57~8.53,轻、重稀土分馏较为明显; $\delta$ Eu=0.68~0.83, Eu负异常较为明显;稀土元素球粒陨石标准化曲线呈轻稀土富集型的右倾型,与后太古宙澳大利亚页岩(PAAS)稀土元素球粒陨石标准化配分曲线较为一致,且相较于后者稀土含量偏低。Sm/Nd值=0.21~0.24,属于源自壳层的花岗岩类以及各种沉积岩范围(<0.3)之内(柴广路等,2016)。

斜长角闪片岩稀土总量明显偏高( $\Sigma$ REE=105.04 $\times 10^{-6}$ ~114.56 $\times 10^{-6}$ ),平均值为109.11 $\times 10^{-6}$ ,明显高于岛弧玄武岩、洋中脊玄武岩稀土总量平均值(分别为38.33 $\times 10^{-6}$ 、59.88 $\times 10^{-6}$ ),略高于平均E-型洋中脊玄武岩(E-MORB)值(84.35 $\times 10^{-6}$ );轻、重稀土元素含量分别为78.72 $\times 10^{-6}$ ~94.00 $\times 10^{-6}$ 和16.56 $\times 10^{-6}$ ~25.66 $\times 10^{-6}$ , $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE=3.07~5.48,轻、重稀土分馏较为明显; $\delta$ Eu=0.8~1.0,无或弱的Eu负异常;稀土元素球粒陨石标准化曲线呈轻稀土富集型的右倾型,与E-MORB稀土元素球粒陨石标准化配分曲线较为一致,且相较于后者稀土含量偏高。

样品2026/1因含有较多的石英杏仁体导致其稀土总量( $\Sigma$ REE=139.51 $\times 10^{-6}$ )略显偏高,本文不作讨论,其余长英质粒岩稀土总量基本稳定( $\Sigma$ REE=74.70 $\times 10^{-6}$ ~85.48 $\times 10^{-6}$ ),平均值为79.70 $\times 10^{-6}$ ,总体略偏高;轻、重稀土元素含量分别为63.56 $\times 10^{-6}$ ~68.64 $\times 10^{-6}$ 和9.53 $\times 10^{-6}$ ~19.35 $\times 10^{-6}$ , $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE=3.28~6.86,轻、重稀土分馏较为明显; $\delta$ Eu=0.85~0.90,显示较弱的Eu负异常;稀土元素球粒陨石标准化曲线呈轻稀土富集型的右倾型,整体配分型式与OIB、E-MORB基本相似。

### 3.2.3 微量元素

由表1中数据和原始地幔标准化蛛网配分图

(图4b)可知,(斜长)黑云石英片岩中Rb、Ba、Th、U等大离子亲石元素较为富集,高场强元素Nb、Ta、Sr等相对较为亏损。其中Rb含量为72.08 $\times 10^{-6}$ ~131.10 $\times 10^{-6}$ ,Ba含量为433.40 $\times 10^{-6}$ ~1002.40 $\times 10^{-6}$ ,Sr含量为86.90 $\times 10^{-6}$ ~269.47 $\times 10^{-6}$ 。总体上看,(斜长)黑云石英片岩元素丰度与大陆地壳平均值相近,Th、U、Nb、Ta、Sr相对大陆上地壳略有亏损,表明其原岩可能来源于大陆上地壳。Rb/Sr比值=0.83~0.91(除样品173/14为0.37外),与活动大陆边缘砂岩值(0.89 $\pm$ 0.24)相近;Ba/Sr=1.61~11.43,变化幅度较大;高场强元素(HFSE)如Nb、Ta、Y等变化范围不大,表明这些元素地球化学性质较稳定,受变质、蚀变等作用的影响不大,其Zr/Hf比值(33.55~44.13)则介于大陆岛弧、大洋岛弧砂岩比值(分别为35.3、45.7)之间,远大于活动大陆边缘和被动边缘比值(分别为26.3、29.5)(Bahatia, 1983)。

斜长角闪片岩在原始地幔标准化蛛网配分图(图4d)显示出大离子亲石元素(Rb、Ba、K)相对较为富集,U、Th相对选择性亏损,Th=2.47 $\times 10^{-6}$ ~4.41 $\times 10^{-6}$ ,远大于MORB含量(0.16 $\times 10^{-6}$ );高场强元素Nb=6.31 $\times 10^{-6}$ ~7.84 $\times 10^{-6}$ ,Ta=0.45 $\times 10^{-6}$ ~0.93 $\times 10^{-6}$ ,高于MORB含量(分别为3 $\times 10^{-6}$ 、0.18 $\times 10^{-6}$ ),但相对Th、La明显亏损,Ti含量略亏损。微量元素原始地幔标准化蛛网图总体类似于OIB,仅Nb、Ta相对较为亏损。其微量元素Ni(16.9 $\times 10^{-6}$ ~32.37 $\times 10^{-6}$ )和Cr(44.13 $\times 10^{-6}$ ~57.81 $\times 10^{-6}$ )均低于判别原始岩浆的参考数值(Ni $\approx$ 250.00 $\times 10^{-6}$ 、Cr $\approx$ 300.00 $\times 10^{-6}$ )(Wendlandt et al., 1995),表明玄武岩浆早期演化过程中可能发生过橄榄石、辉石的结晶分离作用。

除样品2026/1因含有较多的石英杏仁体导致大离子亲石元素波动较大外,其余长英质粒岩大离子亲石元素含量变化基本一致,而高场强元素及不活动元素则均显示一致的变化趋势(图4f),故本文后述凡涉及样品2026/1大离子亲石元素的特征叙述时均不作评述。洋脊花岗岩标准化配分图显示长英质粒岩LILIE主要以Th的相对富集为特征,K<sub>2</sub>O、Rb、Ba元素除样品110/65略有富集外,其余均呈明显亏损状态,Ce等元素略相对富集;高场强元素Nb、Ta相对略显亏损,整体配分曲线与Troodos洋脊花岗岩基本一致,进而暗示其源区具洋中脊亏损地幔特征。综合来看,微量元素特征显示源区为



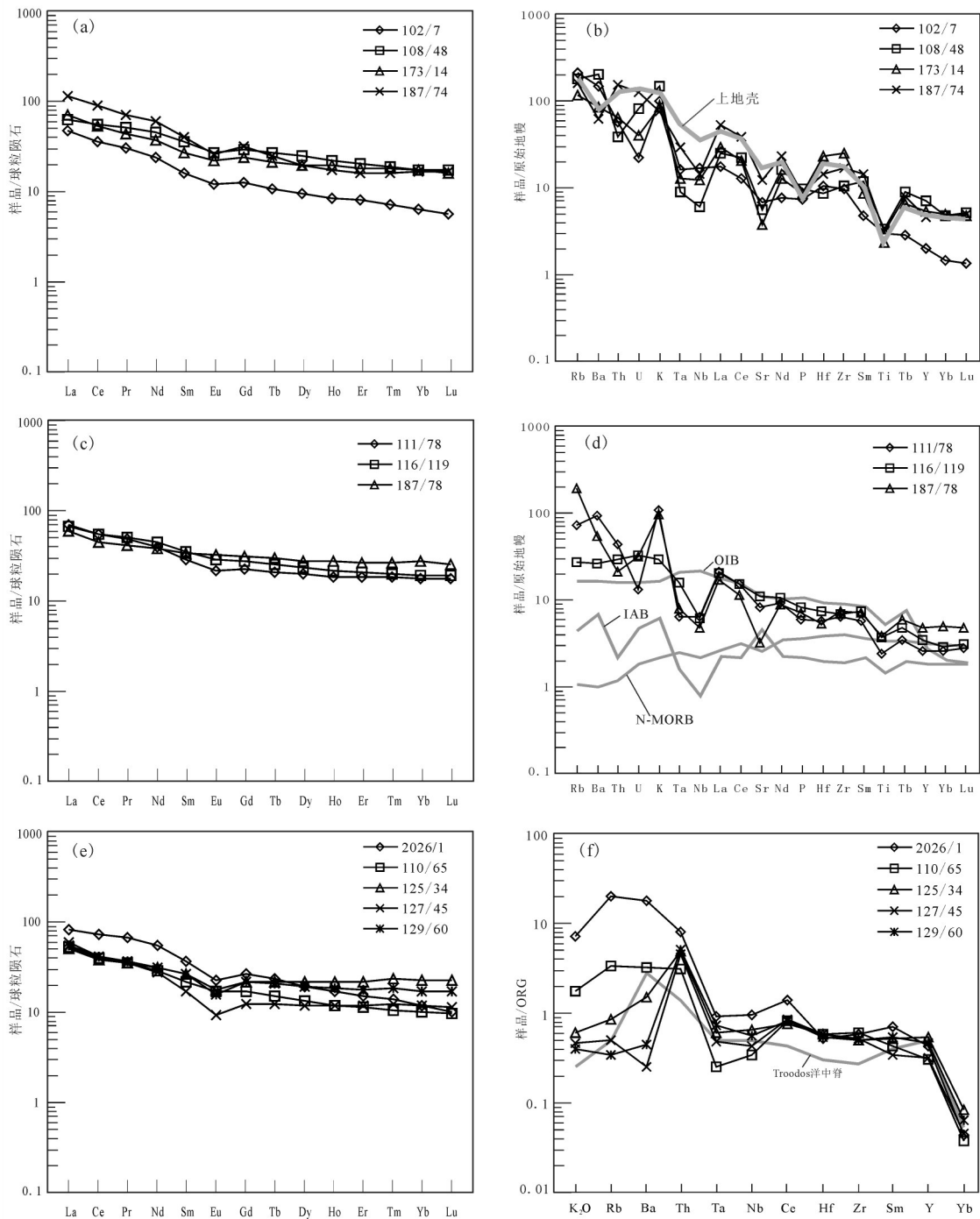


图4 马尔洋岩组变质岩球粒陨石标准化REE配分模式图(a, c, e)和原始地幔(或洋脊花岗岩)标准化微量元素蛛网图(b, d, f)(球粒陨石标准化值及原始地幔标准化值引自 Sun and McDonough, 1989, 洋脊花岗岩标准化值引自 Pearce et al., 1984)  
 Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a, c, e) and trace element spider diagram (b, d, f) of metamorphic rocks in the Maeryang Formation (chondrite data for Normalization and values of primitive mantle after Sun S S and McDonough, 1989, values of Ocean ridge granites after Pearce et al., 1984)

基本未受陆壳物质改造的亏损地幔。

### 3.3 锆石U-Pb年龄

本次工作对老并南一带该套地层下部黑云斜长变粒岩(原岩为含石英杏仁体的变安山岩)进行LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测定。其锆石主体呈浅黄色—无色透明,粒径100~220 μm;阴极发光CL图像(图5a)显示,锆石形态不一,但晶形完好,自形一半自形长柱状,个别短柱状或不规则圆形,长宽比1:1~3.5:1;锆石整体具清晰的岩浆成因振荡环带,环带窄而密;且均发育后期变质增生边,其发光性明显强于核部,其宽度远小于核部。

本次对挑选出来的锆石共进行了84次分析,其变质边过于狭小(2~5 μm)而无法测试。剔除了64个继承锆石和2个明显偏离谐和一致曲线的锆石之后,剩余18个有效测试点数据经普通铅校正,其U-Pb同位素年龄测试结果显示:锆石Th/U比值为0.42~1.97(表2),普遍大于变质成因锆石的Th/U比值(0.002~0.320),显示出岩浆锆石的特征;所测锆石

的表面年龄( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ )均落在谐和线及附近(图5b),其中4个锆石测点因位于振荡环带核部而显示相对较大的年龄值(630~641 Ma),其余14个年龄值则位于571~619 Ma,说明后期变质作用对Pb丢失影响不大,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄( $603\pm 10$ ) Ma应代表火山岩的喷发年龄(图5c)。

## 4 讨论

### 4.1 原岩恢复

区内马尔洋岩组变质岩重结晶程度高,变形较为强烈,岩石原岩组构基本消失殆尽,且基本不发育强烈交代作用的变质岩(交代蚀变岩和混合岩),其成分变化基本上是等化学的,因而岩石地球化学组成基本反映了原岩特征,并主要受原岩形成作用和成岩构造环境所制约。为此,本文在详细的薄片观察基础上,利用岩石地球化学数据,综合运用多种原岩恢复方法对马尔洋岩组各类变质岩进行原岩恢复。

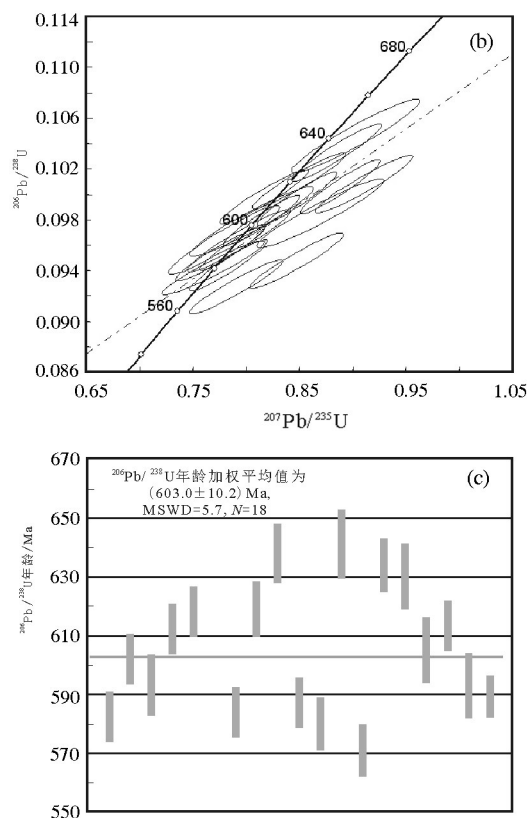
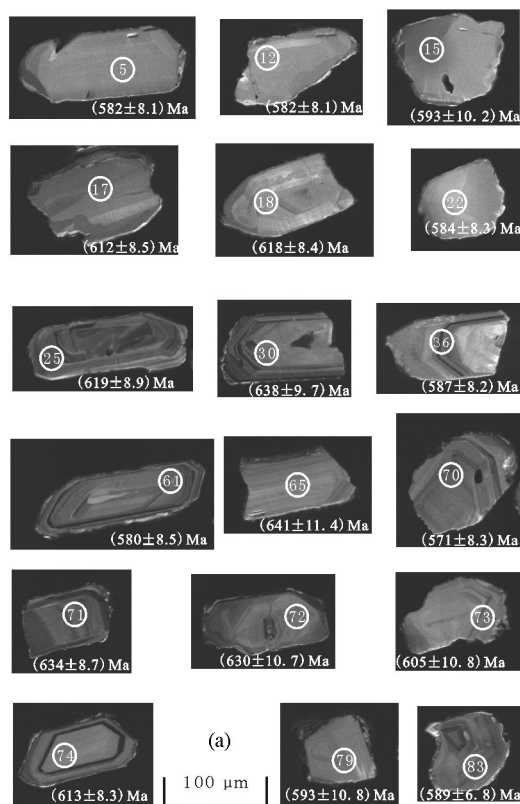


图5 马尔洋岩组变安山岩锆石CL图像(a)及LA-ICP-MS锆石U-Pb谐和图(b, c)

Fig. 5 CL image (a) of zircons and LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram (b, c) of meta-andesite in the Maeryang Formation

表2 马尔洋岩组变安山岩(TW2026/1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope data of meta-andesite (TW2026/1) in the Maeryang Formation

| 点号 | 含量/ $10^{-6}$ |        | Th/U | 同位素比值                             |           |                                  |           |                                  |           | 表面年龄/Ma                           |           |                                  |           |                                  |           |
|----|---------------|--------|------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|
|    | Th            | U      |      | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $1\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $1\sigma$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $1\sigma$ |
| 05 | 79            | 134.34 | 0.59 | 0.06023                           | 0.00194   | 0.78389                          | 0.02422   | 0.0944                           | 0.00134   | 612                               | 42        | 588                              | 14        | 582                              | 8         |
| 12 | 107.3         | 206.57 | 0.52 | 0.06037                           | 0.00183   | 0.81498                          | 0.02381   | 0.09794                          | 0.00132   | 617                               | 40        | 605                              | 13        | 602                              | 8         |
| 15 | 170.9         | 186.73 | 0.92 | 0.05976                           | 0.00251   | 0.79374                          | 0.03206   | 0.09635                          | 0.00162   | 595                               | 58        | 593                              | 18        | 593                              | 10        |
| 17 | 26.38         | 62.21  | 0.42 | 0.06174                           | 0.00188   | 0.84804                          | 0.02475   | 0.09963                          | 0.0014    | 665                               | 39        | 624                              | 14        | 612                              | 8         |
| 18 | 109.34        | 147.84 | 0.74 | 0.06409                           | 0.00186   | 0.88869                          | 0.02477   | 0.10059                          | 0.0014    | 745                               | 36        | 646                              | 13        | 618                              | 8         |
| 22 | 64.66         | 102.17 | 0.63 | 0.06491                           | 0.0023    | 0.84808                          | 0.02897   | 0.09476                          | 0.00144   | 771                               | 46        | 624                              | 16        | 584                              | 8         |
| 25 | 1278          | 1079   | 1.18 | 0.0631                            | 0.0019    | 0.9113                           | 0.0303    | 0.1008                           | 0.0015    | 722                               | 58.3      | 658                              | 16.1      | 619                              | 8.9       |
| 30 | 304           | 463    | 0.66 | 0.0638                            | 0.0020    | 0.9412                           | 0.0301    | 0.1041                           | 0.0017    | 744                               | 32.4      | 674                              | 15.7      | 638                              | 9.7       |
| 36 | 250           | 289    | 0.87 | 0.0576                            | 0.0021    | 0.7757                           | 0.0275    | 0.0953                           | 0.0014    | 517                               | 78.5      | 583                              | 15.7      | 587                              | 8.2       |
| 61 | 235           | 267    | 0.88 | 0.0582                            | 0.0023    | 0.7696                           | 0.0319    | 0.0942                           | 0.0014    | 539                               | 85.2      | 580                              | 18.3      | 580                              | 8.5       |
| 65 | 104           | 142    | 0.73 | 0.0628                            | 0.0029    | 0.9033                           | 0.0398    | 0.1046                           | 0.0019    | 702                               | 100.0     | 654                              | 21.2      | 641                              | 11.4      |
| 70 | 1191          | 604    | 1.97 | 0.0607                            | 0.0022    | 0.7909                           | 0.0290    | 0.0927                           | 0.0014    | 632                               | 77.8      | 592                              | 16.4      | 571                              | 8.3       |
| 71 | 343           | 729    | 0.47 | 0.0611                            | 0.0019    | 0.8856                           | 0.0278    | 0.1033                           | 0.0015    | 643                               | 66.7      | 644                              | 15.0      | 634                              | 8.7       |
| 72 | 95.2          | 236    | 0.40 | 0.0649                            | 0.0028    | 0.9217                           | 0.0380    | 0.1026                           | 0.0018    | 770                               | 90.7      | 663                              | 20.1      | 630                              | 10.7      |
| 73 | 80.7          | 163    | 0.49 | 0.0636                            | 0.0030    | 0.8700                           | 0.0394    | 0.0985                           | 0.0018    | 728                               | 100.0     | 636                              | 21.4      | 605                              | 10.8      |
| 74 | 354           | 424    | 0.83 | 0.0584                            | 0.0021    | 0.8171                           | 0.0275    | 0.0998                           | 0.0014    | 546                               | 86.1      | 606                              | 15.4      | 613                              | 8.3       |
| 79 | 71.8          | 149    | 0.48 | 0.0580                            | 0.0029    | 0.7797                           | 0.0346    | 0.0964                           | 0.0018    | 528                               | 111       | 585                              | 19.8      | 593                              | 10.8      |
| 83 | 571           | 771    | 0.74 | 0.0580                            | 0.0016    | 0.7879                           | 0.0206    | 0.0958                           | 0.0012    | 532                               | 56.5      | 590                              | 11.7      | 589                              | 6.8       |

(斜长)黑云母石英片岩在西蒙南图解(图 6a)中有 3 件样品落入沉积岩与火山岩分界线附近的厚层泥岩区, 1 件样品落入砂岩区; 在  $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  原岩恢复图解(图 6b)上有 2 件样品(102/7、108/48)落入岩浆岩区, 1 件样品(187/74)落入岩浆岩与沉积岩分界线附近的沉积岩区, 1 件样品(173/14)落入沉积岩区, 且 DF 值相应分别为正值或负值。宏观上长英质片岩多发育大理岩夹层, 且接近大理岩的岩性含有较多的钙质成分, 上述特征表明长英质片岩原岩多具沉积岩的特征, 原岩以砂岩类沉积岩为主, 并含有一定的火成岩成分。进一步利用砂岩岩石类型判别图解(图 7a)和 La/Th-Hf 判别图(图 7b)对其岩石类型和物源进行甄别, 投图结果表明砂岩以杂砂岩为主, 少量为岩屑砂岩, 其物源区组成较为复杂(投点在长英质岛弧源区及外侧古老沉积物增加方向、长英质/基性岩混合源区均有分布)。

在西蒙南图解上 2 件斜长角闪片岩落入火山岩区, 1 件样品(187/78)因 si 值偏低导致其投点落在火山岩的左上方而与泥质沉积岩重叠(见图 6a); 在  $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  原岩恢复图解(图 6b)上全部落入岩浆岩区; 除 187/74 样品 DF 值小于 0 外, 其余 2 件

样品均为正值。该类岩石多与长英质粒岩呈不等厚互层状产出,  $\text{SiO}_2$  含量为 51.24%~55.09%, 综合判断其原岩属中基性火山岩。

长英质粒岩在西蒙南图解上(图 6a)大部分在火成岩及其邻近的砂岩区, 落入砂岩区的样品可能因 si 值偏高导致其投点落在火山岩上方, 且若扣除掉样品 2026/1 的石英杏仁体(10%~15%), 其投点也可能落在火山岩区; 在  $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  原岩恢复图解(图 6b)上全部落入岩浆岩区及邻区; DF 值大部分大于 0(除样品 2026/1 小于 0 外), 上述特征表明长英质粒岩原岩主要为火成岩。该类岩石多与斜长角闪片岩呈不等厚互层状产出,  $\text{SiO}_2$  含量为 69.16%~74.14%, 综合判断该类岩石原岩为酸性火山岩。

2 件斜长角闪片岩里特曼指数( $\sigma=4.33、5.83$ )大于 3.3, 属碱性玄武岩系列, 相应地在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图上(图 8a)落入碱玄武岩系列; 1 件斜长角闪片岩里特曼指数( $\sigma=1.65$ )小于 3.3, 属亚碱性玄武岩系列, 相应地在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图上(图 8a)落入钙碱性玄武岩系列。长英质粒岩里特曼指数( $\sigma=0.98\sim 1.76$ )则表明斜长浅粒岩的原岩属钙性系列流纹岩,  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图解(图 8a)



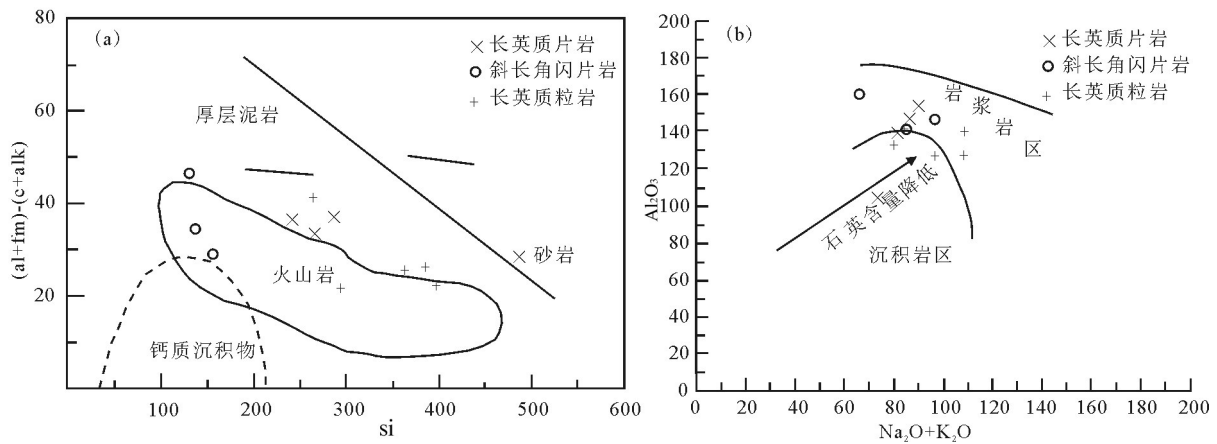


图6 马尔洋岩组变质岩的西蒙南图解(a底图据王仁民等, 1987)和 $Al_2O_3-(Na_2O+K_2O)$ 判别图解(b底图据邱家骧和林景仟, 1991)  
 Fig. 6 Simonen plot (a after Wang Renmin et al., 1987) and  $Al_2O_3-(Na_2O+K_2O)$  diagram (b after Qiu Jiaxiang and Lin Jingqian, 1991) of metamorphic rocks in the Maeryang Formation

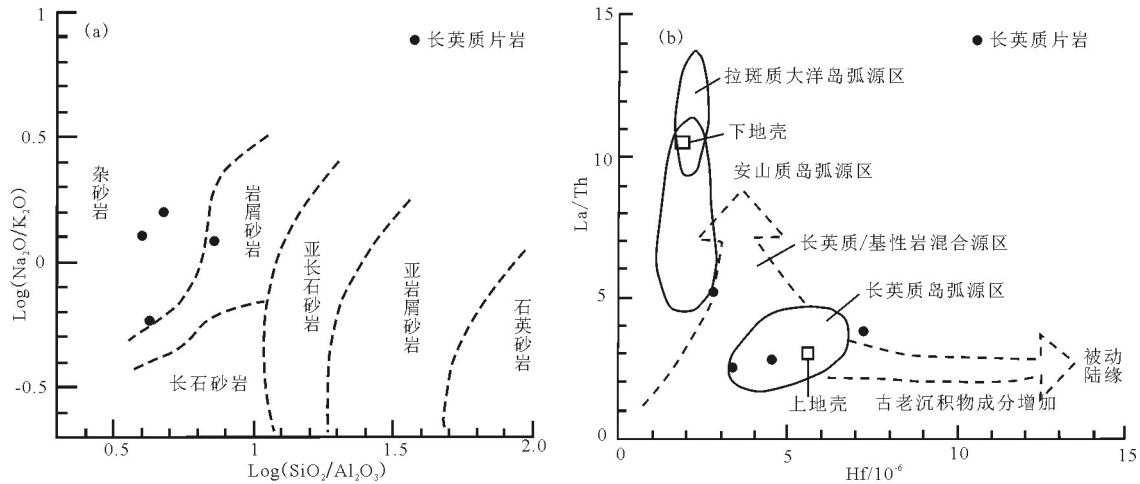


图7 马尔洋岩组长英质片岩的砂岩类型判别图(a, 据Herron, 1988)和La/Th-Hf判别图(b, 据Floyd et al., 1987)  
 Fig. 7 Sandstone discriminant diagram (a, after Herron, 1988) and La/Th versus Hf diagram (b, after Floyd et al., 1987) of felsic schist in the Maeryang Formation

显示属低钾拉斑玄武岩系列。为排除后期变质及蚀变作用的影响,进一步利用 $Zr/TiO_2-SiO_2$ 图解(图8b)研究斜长角闪片岩和长英质粒岩的原岩特征,投图结果显示斜长角闪片岩、长英质粒岩分别落入亚碱性玄武岩区(1件落入安山岩区)、流纹岩/流纹英安岩区。综合上述特征,斜长角闪片岩原岩可能为亚碱性玄武岩/玄武安山岩,斜长浅粒岩原岩可能为钙性系列流纹岩,二者 $SiO_2$ 含量(51.24%~55.09%、69.16%~74.14%)Daly缺口明显,属双峰式火山岩系。

综上,马尔洋岩组原岩恢复为一套双峰式火山岩-碎屑岩-碳酸盐岩的火山-沉积建造组合。

#### 4.2 地层时代及厘定

塔什库尔干地区含铁岩系原划属古元古界布伦阔勒岩群(Pt<sub>1</sub>B)。布伦阔勒岩群为新疆地质局区域地质测量大队于1967年创立于布伦口-木吉一带,为一套中、深区域变质岩,划分为太古宇-元古宇,称布伦阔勒群;汪玉珍等(1985)将该套地层的时代定为元古宙,称布伦阔勒岩群;刘振涛等(2000)将塔什库尔干县瓦恰一带的布伦阔勒岩群进一步细分为瓦恰岩组、五古力牙特岩组,部分划为赛图拉岩群塔米尔岩组,首次采用锆石Pb-Pb蒸发法测定该套地层年龄为(1174±35) Ma,时代定为长城纪;王

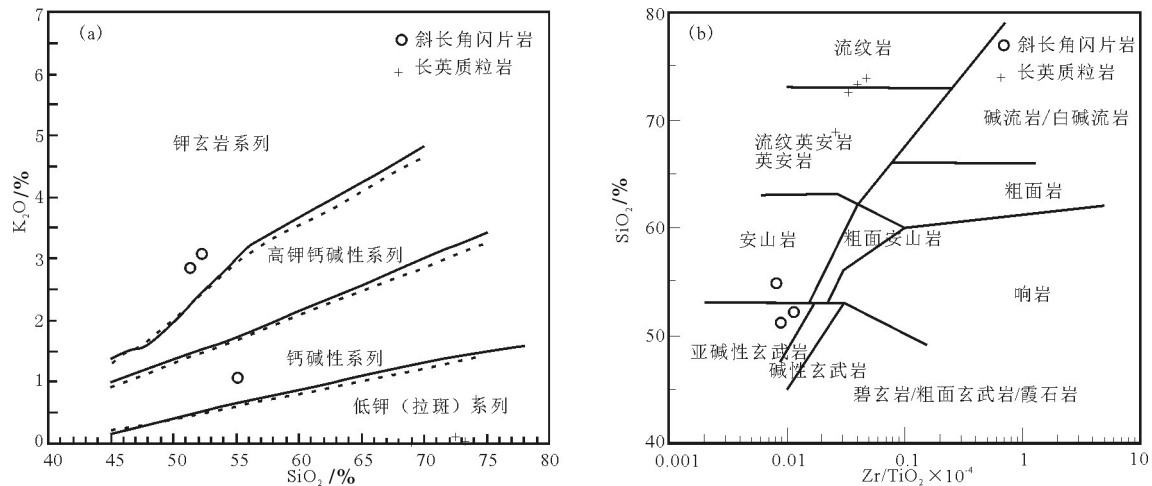


图8 马尔洋岩组变质岩  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$ 图解(a,底图据徐夕生和邱检生,2010)和  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$ 图解(b,据 Winchester and Floyd, 1977)  
Fig. 8  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  diagram (a,after Xu Xisheng and Qiu Jiansheng, 2010) and  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  diagram (b,after Winchester and Floyd, 1977) of metamorphic rocks in the Maeryang Formation

世炎等(2014)依据其岩石组合、变质形程度明显有别于区内富含微古植物化石的长城系地层,将其时代仍定为早元古代,沿用布伦阔勒岩群,并进一步细化分为含铁岩段、(含石榴石)斜长角闪片麻岩段、夕线石榴片麻岩-石英岩段和大理岩段等4套变质建造组合,并指出老并、乔普卡里莫(赞坎)等磁铁矿点赋存于含铁岩段内。刘品德等(2012)进一步将塔什库尔干地区布伦阔勒岩群的含铁岩段重新厘定为早古生代含铁岩系( $P_z$ HT)。

近年来,不同学者在“布伦阔勒岩群”中获得了大量的年代学证据(表3),这些数据表明布伦阔勒岩群是由不同时代的地层或变质体构成。本次在该区开展1:5万区域地质调查工作发现,该套含铁岩系同前述布伦阔勒岩群之间在岩石组合、变质变形、含铁特征及原岩恢复等方面存在较大的差异,二者为马尔洋-白尔力克达坂韧性断层所分割,应予解体。现有锆石U-Pb同位素年龄表明这套含铁岩系的成矿时代多数集中于早—中寒武世(表3),代表性年龄的主要有塔阿西变英安岩锆石U-Pb年龄( $521.3 \pm 3.3$ ) Ma(高晓峰等,2013)、赞坎南、老并南长英质片岩碎屑锆石U-Pb年龄526 Ma(燕长海等,2012)、莫喀尔斜长角闪岩(黄朝阳等,2014)、喀来子黑云斜长片麻岩(原岩为中—酸性火山岩)锆石U-Pb年龄( $537.2 \pm 6.4$ ) Ma(郑梦天等,2016)。而本次在老并南该地层第一岩段黑云斜长变粒岩(原岩为含石英杏仁体的变安山岩)中新获的锆石U-Pb年龄( $603 \pm 10$ ) Ma表明,第一

岩段形成时代为早震旦世;且卡拉本一带花岗闪长岩侵入体的锆石U-Pb年龄加权平均值( $514.0 \pm 9.3$ ) Ma(另文发表),进一步限定了该含铁岩系的沉积时代不晚于中寒武世。综合来看,将该套地层时代置于震旦纪—寒武纪纽芬兰世是较为合理的,并将其厘定为震旦系—寒武系纽芬兰统马尔洋岩组( $ZC_1m$ )。

#### 4.3 构造环境

上述分析表明研究区马尔洋岩组为一套典型的双峰式火山-沉积岩组合,双峰式火山岩为拉张伸展背景下的产物,可形成于大陆裂谷、大洋岛屿、洋内岛弧、活动大陆边缘、弧后盆地等多种不同的大地构造背景(王焰等,2000)。研究表明,花岗质岩石的地球化学特征主要受源区组成和岩浆结晶演化过程的制约,构造环境往往是次要控制因素(Frost et al., 2001),而玄武质岩石的地球化学组成对示踪地幔源区性质及其形成的构造环境具有比较明确的指示意义(Li Xianhua et al., 2002)。

研究区双峰式火山岩具有明显的Daly成分间断,缺乏安山质岩石,明显不同于以安山岩类大量出现为特征的陆缘岩浆弧,基本可以排除活动大陆边缘环境。马尔洋岩组双峰式火山岩的基性端元明显以高 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、略高的 $\text{TiO}_2$ 和低 $\text{P}_2\text{O}_5$ 而与大洋岛屿玄武岩(总体具较高的 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 和较低的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量,LREE强烈富集)相区别(Gill, 1981; Brouxel et al., 1987; Geist et al., 1995)。

斜长角闪片岩 $\text{TiO}_2$ 含量远大于岛弧玄武岩(约

表3 原划“布伦阔勒岩群”锆石U-Pb同位素年龄统计  
Table 3 The U-Pb age of zircons in the rocks previously defined as “bulunkuole Group”

| 采用地点   | 测年对象    | 测试方法      | 年龄/Ma             | 锆石类型      | 资料来源       |
|--------|---------|-----------|-------------------|-----------|------------|
| 塔县南部   | 泥质片麻岩   | SHRIMP    | 600~2 200         | 碎屑锆石      | 张传林等, 2007 |
| 老并铁矿   | 长英质片岩   | LA-ICP-MS | 532               | 碎屑锆石      | 燕长海等, 2012 |
|        | 黑云石英片岩  |           | 526               |           |            |
| 布伦口铜厂沟 | 石英岩     | LA-ICP-MS | 515/219           | 碎屑锆石/变质锆石 | 杨文强, 2013  |
| 孜落依    | 黑云石英片岩  | LA-ICP-MS | 500               | 碎屑锆石      | 杨文强, 2013  |
|        | 二云石英片岩  |           | 495               |           |            |
| 塔县一班迪尔 | 云母石英岩   | LA-ICP-MS | 296               | 碎屑锆石      | 杨文强, 2013  |
|        | 高压泥质片麻岩 |           | 251/221           |           |            |
| 塔阿西    | 斜长角闪片岩  | LA-ICP-MS | 517               | 岩浆锆石      | 黄朝阳, 2014  |
| 塔阿西    | 变英安岩    | LA-ICP-MS | 521               | 岩浆锆石      | 高晓峰等, 2013 |
| 叶里克    | 黑云石英片岩  | LA-ICP-MS | 464               | 碎屑锆石      |            |
| 莫喀尔    | 斜长角闪岩   | LA-ICP-MS | 511               | 岩浆锆石      | 黄朝阳, 2014  |
| 莫喀尔    | 黑云石英片岩  | LA-ICP-MS | 512               | 碎屑锆石      |            |
| 赞坎南    | 变流纹岩    | LA-ICP-MS | 2481              | 岩浆锆石      | 计文化等, 2011 |
| 赞坎铁矿   | 磁铁矿石    | LA-ICP-MS | 2465~1959/904~558 | 碎屑锆石      | 杨文强, 2013  |
|        | 黑云石英片岩  |           | 706~2500          |           |            |
| 赞坎铁矿   | 变粒岩     | LA-ICP-MS | 2416              | 岩浆锆石      | 李智泉等, 2015 |
| 喀来子    | 黑云斜长片麻岩 | LA-ICP-MS | 537.2             | 岩浆锆石      | 郑梦天等, 2016 |
| 老并南    | 变安山岩    | LA-ICP-MS | 603               | 岩浆锆石      | 本文         |

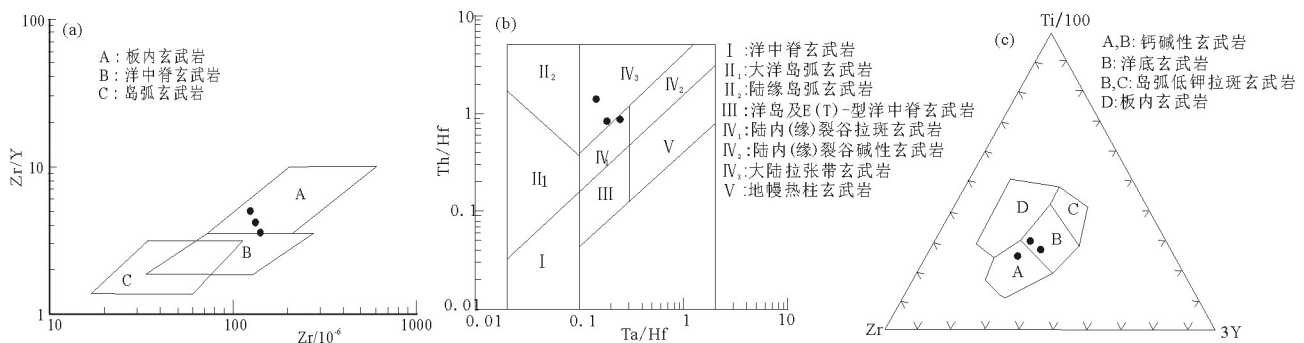


图9 马尔洋岩组斜长角闪片岩的Zr-Zr/Y(a,据Pearce, 1982)、Ta/Hf-Th/Hf图解(b,据汪云亮等, 2001)和Ti/100-Zr-3Y图解(c,据Pearce and Cann, 1973)

Fig. 8 Zr-Zr/Y diagram (a, after Pearce, 1982), Ta/Hf-Th/Hf diagram (b, after Wang Yunliang et al., 2001) and Ti/100-Zr-3Y diagram (c, after Pearce and Cann, 1973) of amphibolite schist in the Maeryang Formation

0.8%),且Th明显大于Ta含量,而不同于由亏损地幔部分熔融形成的玄武岩(MORB)特征(Th、Ta含量大体相当)(Pearce., 1984b),表明其可能受到陆壳的混染或源自一个富集地幔的源区。为排除因大陆地壳或岩石圈的混染作用而导致玄武质岩石带有岛弧型信号的影响(夏林圻等, 2007),本文选取受地壳物质混染影响不大的Zr、Y元素,利用Zr-Zr/Y图解判别岛弧玄武岩与大陆玄武岩,投图结

果(图9a)表明,这些基性岩的Zr/Y比值均高于岛弧玄武岩而落入靠近MORB区的WPB区。元素对比值(Th/Hf、Ta/Hf)对分离结晶作用不敏感的,其投图结果(图9b)表明3件样品落在陆内裂谷/陆缘裂谷拉斑玄武岩区及其余与大陆拉张带(初始裂谷)玄武岩区的分界线附近。且基性火山岩端元原岩类型为响岩质碱性玄武岩系列也进一步指示了大陆裂解成因。但在区分板内与非板内玄武



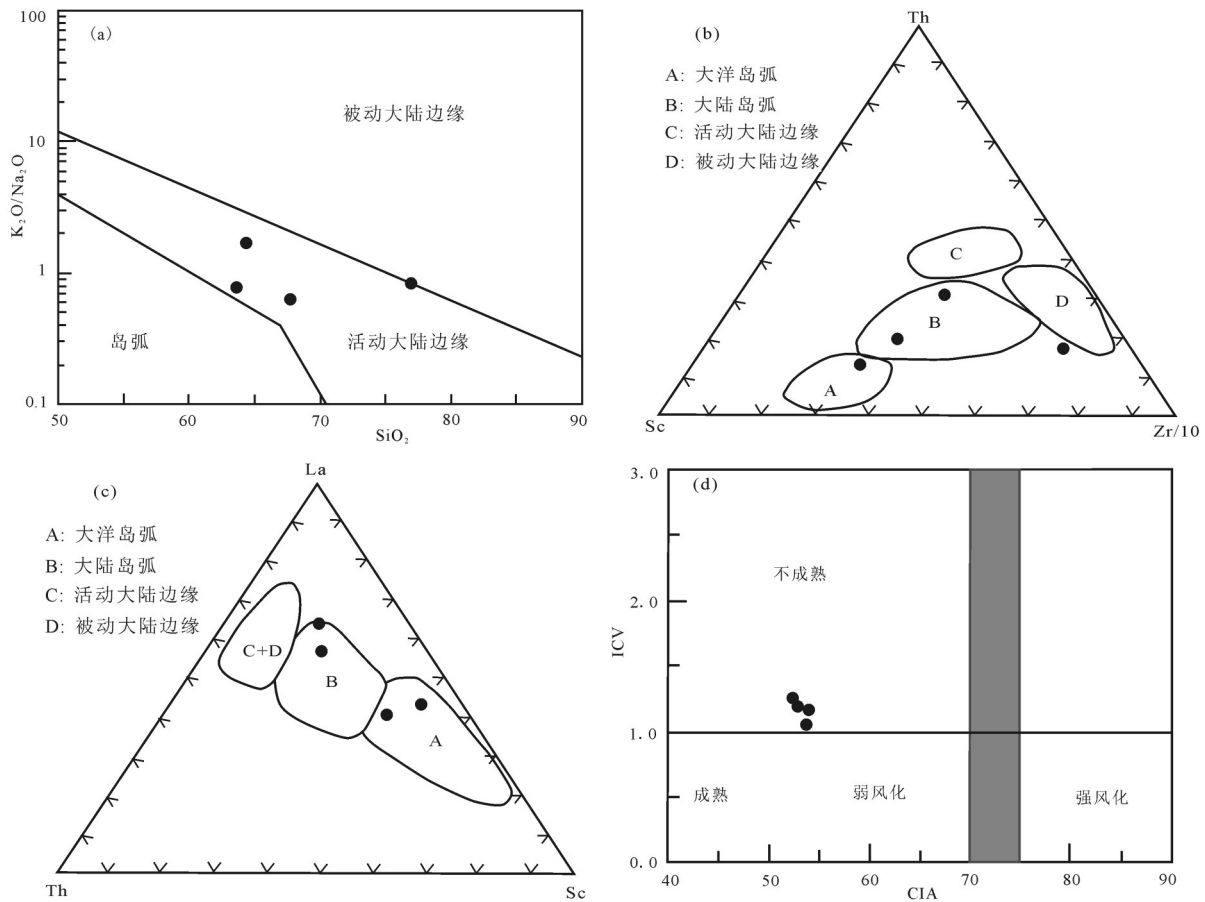


图10 马尔洋岩组长英质片岩的 $K_2O/Na_2O-SiO_2$ 图解(a,据Roser and Korsch, 1986)、 $Th-Sc-Zr/10$ 图解(b,据Bhatia and Crook, 1986)、 $La-Th-Sc$ 图解(c,据Bhatia and Crook, 1986)和 $ICV-CIA$ 图解(d,据王仁民等, 1987)

Fig. 10  $K_2O/Na_2O-SiO_2$  diagram (a,after Roser and Korsch, 1986),  $Th-Sc-Zr/10$  diagram (b,after Bhatia and Crook, 1986),  $La-Th-Sc$  diagram (c,after Bhatia and Crook, 1986) and  $ICV-CIA$  diagram (d,after Wang Renmin et al., 1987) of felsic schist in the Maeryang Formation

岩的  $Ti/100-Zr-3Y$  三角图解(图 9c)上,斜长角闪片岩投点均落入非板内的岛弧钙碱性玄武岩区,从而又显示了非典型板内玄武岩的特征。综合上述特征,暗示马尔洋岩组内双峰式火山岩可能产于陆缘裂谷环境,并具受流体/熔体交代富集的亏损地幔源区特征。

同时,碎屑沉积岩的物质组成可以反演其物源和大地构造环境 (Bhatia and Crook, 1986; McLennan and Taylor, 1991)。马尔洋岩组长英质片岩  $\omega(Al_2O_3)/\omega(Al_2O_3+Fe_2O_3)$  值为 0.69~0.81,介于大陆边缘环境值之间(0.6~0.9),而大于远洋深海沉积值(0.4~0.7)和洋脊海岭环境值(0.1~0.4);在  $SiO_2-K_2O/Na_2O$  图解中,4件长英质片岩全部落入活动大陆边缘区(图 10a)。同时长英质片岩在  $Th-Sc-Zr/10$  图

解(图 10b)和  $La-Th-Sc$  图解(图 10c)上的大洋岛弧、大陆岛弧区均有分布,且稀土元素组成也均介于大陆岛弧砂岩、大洋岛弧砂岩之间(Bhatia and Crook, 1986)。其化学蚀变指数( $CIA=51.5\sim 53.0$ )反映其源区发生较弱的化学风化作用,成分变异指数( $ICV=1.02\sim 1.24$ )指示其原岩中含少量黏土矿物,碎屑岩成熟度差(裴国栋等,2018)。 $ICV-CIA$  图解(图 10d)指示其原岩来自一个不成熟、弱风化的物源区。上述地化特征均指示马尔洋岩组长英质片岩原岩具活动陆缘沉积的特征。

已有研究资料表明,西昆仑及邻区在南华纪—寒武纪早期整体处于伸展和减薄的构造背景下(姜春发等,2000;潘裕生,2000;张传林,2003;李荣社等,2008)。研究区迄今还未发现震旦纪—寒武纪之

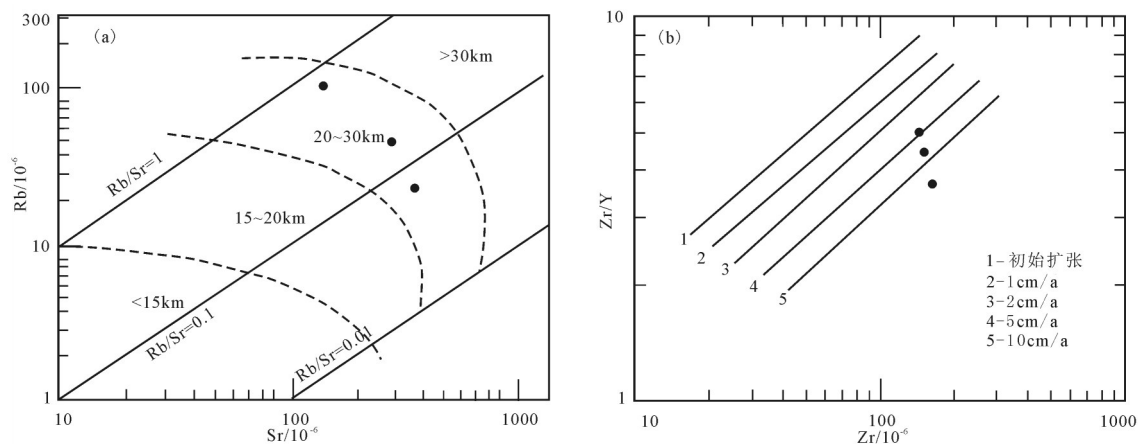


图 11 马尔洋岩组斜长角闪片岩 Rb-Sr 图解(a 据 Condie and Been, 2006)和 Zr/Y-Zr 扩张速率图(b 底图据汪晓伟等, 2015)  
Fig. 9 Rb-Sr diagram (a after Condie and Been, 2006) and Zr/Y-Zr diagram (b after Wang Yunliang et al., 2015) of amphibolite schist in the Maeryang Formation

间的大洋地壳和海沟沉积物、蛇绿混杂岩、双变质带和板块俯冲的其他证据, 该区震旦纪—寒武纪纽芬兰世双峰式火山岩的广泛发育表明塔什库尔干地区在该时期并不是处于岛弧环境, 而是以一个陆壳为基底的陆缘裂谷。高晓峰等(2013)对塔阿西一带双峰式火山岩研究也证实了区内的大陆拉张作用一直延续到早寒武世。其中基性端元 Rb-Sr 地壳厚度网络图(图 11a)表明, 研究区地壳厚度为 20.0~30.0 km, 并根据 Zr/Y-Zr 图(图 11b)推断当时地壳拉张速率介于 5.0~10.0 cm/a, 与现代大洋扩张速率(一般为 1.5~5.0 cm/a)和现代红海及非洲埃塞俄比亚裂谷带的拉张速率(一般为 0.5~1.2 cm/a)等相比较(Thompson, 1982), 该速率反映了塔什库尔干地区当时处于快速拉张状态。

#### 4.4 矿产成因

该套含铁岩系发育典型硬石膏、重晶石、黄铁矿和磁铁矿等膏(钡)-铁建造为特征, 其中老并矿区主要显示为一套膏-铁建造组合, 莫拉赫矿区则显示钡-铁建造组合, 自西向东总体显示硬石膏逐渐减少、重晶石逐渐增多之趋势。其形成时代与全球“雪球地球”的时代及 Rapihan-Type 的 BIF 时代相近(Zhang Zhaochong et al., 2014; Li Houmin et al., 2014), 研究区以磁铁矿为主(含少量黄铁矿), 矿石具浸染状构造(次为条纹、条带构造), 脉石矿物主要有(硬)石膏、石英、绿泥石, 主要含铁建造类型组合为膏(钡)-铁(磁铁矿、黄铁矿)、石英-磁铁矿、黄铁矿-磁铁矿等 3 种不同类型; 与 Rapihan 型 BIF(中国

称新余式铁矿, 以磁铁矿、镜铁矿为主, 次为假象赤铁矿、褐铁矿和黄铁矿), 矿石具条带状构造(次为浸染状), 脉石矿物主要为石英(次为绿泥石、绢云母), 主要含铁建造类型组合磁铁石英岩、绿泥磁铁石英岩、磁铁镜铁石英岩和氧化矿等 4 种不同类型)相比, 二者赋矿地层均为一套经历绿片岩相变质的海相火山-沉积岩建造, 不同之处在于研究区为双峰式火山岩, 且在矿石矿物组成、构造、类型上均有一定的差别, 但二者均显示其成矿过程与新元古代火山活动存在密切的共生关系。

不少学者对该套地层中的膏(钡)-铁建造开展了大量的矿床成因研究。燕长海等(2012)对老并、赞坎等一带铁矿床的稳定同位素研究发现, 该膏-铁建造中的硬石膏以富集重硫为特征( $\delta^{34}\text{S}=29.00\text{‰}\sim 37.5\text{‰}$ , 平均值为 35.12‰), 黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值(5.24‰~19.72‰, 平均值为 14.80‰)、磁铁矿  $\delta^{18}\text{O}$  值(+3.3‰~+7.2‰)与原生沉积磁铁矿和海相火山沉积型铁矿(冀东铁矿)相似, 并与中基性火山岩  $\delta^{18}\text{O}$  近于一致, 并据此认为 Fe 主要来源于海底中基性火山岩, S 则来源于海底火山热液, 属于海相火山-沉积的原生磁铁矿床, 而非由菱铁矿或赤铁矿经变质作用形成。陈登辉等(2013)、郑梦天等(2016)对喀来子一带的重晶石-磁铁矿建造开展了成矿物质来源及成矿机制研究, 发现重晶石( $\delta^{34}\text{S}=39.27\text{‰}\sim 42.77\text{‰}$ )、硬石膏( $\delta^{34}\text{S}=39.50\text{‰}\sim 40.70\text{‰}$ )同样以富集重硫为特征; 黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值(16.80‰~23.46‰)与全球 VMS 型矿床的  $\delta^{34}\text{S}$  值(17.5±2.5)‰较为接近, 并认为 Fe、Ba 主要

来源于海底喷流热液,而S来源于海水硫酸盐的还原硫,铁矿的形成与海水硫酸盐关系密切。上述研究表明区内磁铁矿为原始沉积成因,膏(钡)-铁建造的形成与海相火山活动关系密切。

值得注意的是,在老井、喀来子两地该含铁岩系的硬石膏和重晶石  $\delta^{34}\text{S}$  值十分接近,指示它们具有相同的硫来源(海水硫酸盐),与新元古代晚期—寒武纪(600~500 Ma)时期古海水硫酸盐的  $\delta^{34}\text{S}$  值基本一致。此时期正值“Marinoan 雪球”事件(600 Ma 左右)的结束,全球进入冰期后的升温回暖阶段,一般认为由于地球系统的变化(如 Rodinia 超大陆的裂解、超级地幔柱的活动)导致海底火山的去气作用,造成大气中  $\text{CO}_2$  高达现在的 350 倍时,地球上出现极端的温室环境,冰川才快速结束(储雪蕾,2004)。而区内马尔洋岩组双峰式火山岩的发育很可能是这一地球系统变化的岩浆响应,据此可以大致刻画其成矿过程为:震旦纪—寒武纪早期为铁矿形成的主要时期,该时期塔什库尔干陆块在张裂作用下形成双峰式火山岩,并伴随着强烈的海底火山作用,海底火山喷发或喷气活动带来了大量的 Fe、Ba、Ca、 $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等成矿物质,含矿溶液在运移过程中,并与海水中的硫酸盐作用形成,在适宜的条件下促使铁质和盐类物质发生卸载沉淀,在海盆中特定的沉积条件下经化学沉积作用形成膏(钡)-铁建造。

## 5 结 论

(1)塔什库尔干地区含铁岩系在岩石组合和地层时代等方面与古元古界布伦阔勒岩群有较大的差异,结合锆石年代学研究,将其厘定为震旦系—寒武系纽芬兰统马尔洋岩组(ZC<sub>1</sub>m)。

(2)含铁岩系内双峰式火山岩的发育证实区内在震旦纪—早寒武世仍处于拉张伸展背景,其火山—沉积组合特征表明其形成于大陆边缘裂谷构造环境。

(3)含铁岩系典型的膏(钡)-铁建造很可能为新元古代晚期“Marinoan 雪球”冰期后地球系统变化的火山—沉积响应。

**致谢:**工作中得到了西安地质调查中心滕家欣、校培喜、伍跃中等研究员和高永宝博士的大力指导和帮助,审稿专家和责任编辑对本文提出了十分宝贵的修改意见和建议,在此一并表示由衷的感谢!

## References

- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *Journal of Geology*, 91(6): 611–627.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywacks and tectonic setting discrimination of sedimentary basin[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181–193.
- Brouxel M, Lapierre H, Michard A, Albrede F. 1987. The deep layers of a Paleozoic arc: Geochemistry of the Copley–Blaklala series, northern California[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 85: 386–400.
- Chai Guanglu, Li Shuangying. 2016. Geochemical characteristics and geological implication for the metamorphic rocks of Foziling Group in the eastern of North Huaiyang tectonic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(4): 29–45(in Chinese with English abstract).
- Chen Denghui, Wu Yuezhong, Liu Wenming, Wang Wenan, Qiao Gengbiao, Zhao Xiaojian. 2013. Geological characteristics and genesis of the iron deposits in the Taxkorgan area, west Kunlun[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 671–684(in Chinese with English abstract).
- Chen Junkui, Yan Changhai, Zhang Wangsheng, Gao Tingchen, Lv Xianhe, Zhang Shaobo, Hu Xiaochuan. 2011. Geological characteristics and prospecting direction of the magnetite iron deposits in the Taxkorgan, Xinjiang[J]. *Geological Survey and Research*, 34(3): 179–189(in Chinese with English abstract).
- Chu Xuelei. 2004. “Snowball Earth” during the Neoproterozoic [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(3): 233–238(in Chinese with English abstract).
- Condie K C and Been K. 2006. Archean geodynamics: Similar to or different from modern geodynamics[J]. *American Geophysical Union Mono-Graph*, 164: 47–59.
- Dong Lianhui, Feng Jing, Zhuang Daoze, Li Fengming, Qu Xun, Liu Dequan, Tang Yanling. 2011a. Dissucation of metallogenic models, mineralization characteristic and main type of rich iron ore of Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 29(4): 416–422(in Chinese with English abstract).
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531–542.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048.
- Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Kang lei, Zhu Haiping, Guo Lei, Xi Rengang, Dong Zengchan. 2013. Origin of the volcanic rocks from the Ta`axi Region, Taxkorgan Xinjiang and its significance[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(6): 1169–1182(in Chinese with English abstract).



- Geist D, Howard K A, Larson P. 1995. The generation of oceanic rhyolites by crustal fractionation: The basalt-rhyolite association at Volcano Alcedo, Galapagos Archipelago[J]. *Journal of Petrology*, 36: 965-982.
- Gill J B. 1981. Orogenic andesites and plate tectonics[J]. Springer-Verlag: 1-390.
- Herron M M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5): 820-829.
- Hu Jianwei, Zhuang Daoze, Yang Wanzhi. 2010. The prediction model of comprehensive information and its application in the prediction of region of Zankan iron deposit in Taxkorgan County, Southwest Xinjiang[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(10): 1495-1503(in Chinese with English abstract).
- Huang Chaoyang. 2014. Geological Characteristics and Genesis of the Iron Deposit in the Brunguole Group, West Kunlun[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences: 1-108(in Chinese).
- Ji Wenhua, Li Rongshe, Chen Shoujian, He Shiping, Zhao Zhenming, Bian Xiaowei, Zhu Haiping, Cui Jigang, Ren Juangang. 2011. The discovery of Palaeoproterozoic volcanic rocks in the Bulunkuoler Group from the Tianshuihai Massif in Xinjiang of northwest China and its geological significance[J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54: 61-72 (in Chinese).
- Jiang Chunfa, Wang Zongqi, Li Jintie. 2000. Opening-closing Tectonics of Center Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-154(in Chinese).
- Li Rongshe, Ji Wenhua, Yang Yongcheng, Yu Pusheng, Zhao Zhenming, Chen Shoujian, Mengyong, Pan Xiaoping, Shi Bingde, Zhang Weiji, Li Xing, Luo Changyi. 2008. Geology of Kunlun Mountain and its Adjacent Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 68-127(in Chinese).
- Li Houmin, Zhang Zengjie, Li Lixing, Zhang Zhaochong, Chen Jing, Yao Tong. 2014. Types and General characteristics of the BIF-related Iron deposits in China[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 264-287.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, Liu Ying, Kinny P D. 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian rift of south China: Implications for the initial rifting of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 113: 135-154.
- Li Zhiquan, Zhang Lianchang, Xue Chunji, Zheng Mengtian, Hao Yanhai, Shi Yujun. 2015. Geological and geochemical characteristics of Zankan iron deposit in the West Kunlun mountains[J]. *Chinese Journal of Geology*, 50(1): 100-117(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianpin, Wang He, Ren Guangli, Fu Wangwei, Wu Yufeng. 2009. Types and exploration prospect in the West Kunlun iron ore deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 439-441(in Chinese with English abstract).
- Liu Pinde. 2014. Geological Features and Mineralization Process of Laobing gypsum Magnetite deposit in Taxkorgan region of west Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 47(4): 227-236(in Chinese with English abstract).
- Liu Pinde, Yan Changhai, Zhang Shaobo, Chen Junkui, Liao Shijin, Zhao Jianmin, Chen Lei, Zhang Gehong, Yang Ruixi, Yang Fan, Li Shanpo, Lv Guoying, Cao Wenyong, Liu Ying, Zhang Tielin, Liu Jiaju, Chen Hongmin, Zhang Jianjun, Liu Chuanquan, Cheng Guo'an, Yu Lei. 2012. The investigation report of Lead-Zinc ore prospect of Taxkorgan area in western Kunlun, Xinjiang[R]. Zhengzhou: Henan Institute of Geological Survey, 22-81(in Chinese).
- Liu Yu, Kuang Aibing, Zhang Jing. 2011. Xinjiang Taxkorgan county Laobin-Zankan-Talugou area iron ore deposit geological characteristics and origin analysis[J]. *Acta mineralogica Sinica*, 31(S1): 373-375(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhentao, Yang Haibo, Wang Yuewu, Zhang Miaohong, Zhao Xuelian. 2000. The regional geological report of Xialafudie map, Bandier map: Scale 1: 50000, Xinjiang[R]. Urumqi: Xinjiang Institute of Geological Survey, 13-17(in Chinese).
- McLennan S M, Taylor S R. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. *Journal of Geology*, 99:1-21.
- Pan Yusheng, Wen Shixuan, Sun Dongli. 2000. Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains[M]. Beijing: Science Publishing House, 1-523(in Chinese).
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[C]// Thorps R S(ed.). *Andesite*. New York: John Wiley and Sons, 525-548.
- Pearce J A, Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined by using trace element analyses[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19: 290-300.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Petrol.*, 25(4):956-983.
- Pearce J A, Lippard S J and Roberts S. 1984b. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[C]// *Marginal Basin Geology*. Geological Society of London Special Publications, 16: 77-94.
- Pei Guodong, Gong Xiaoping, Ma Huadong, Guan Chuanshuo, Du Weiqiang, Liu Yangyang, Ouyang Chengzhao, Li Xiaoguang. 2018. Geochemical characteristics and formation environments of metamorphic rocks in the Kanas Group of Altay tectonic belt[J]. *Geology in China*, 45(1): 141-154(in Chinese with English abstract).
- Qiao Gengbiao, Wang Ping, Wu Yuezhong, Hao Yanhai, Zhao Xiaojian, Chen Denghui, Lü Pengrui, Du Wei. 2015. Formation age of ore-bearing strata of the Zankan iron deposit in Taxkorgan landmass of western Kunlun mountains and its geological significance[J]. *Geology in China*, 42(3): 616-630(in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiexiang, Lin Jingqian. 1991. Petrochemistry[M]. Beijing:

- Geological Publishing House, 261–263(in Chinese).
- Roser B P and Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio[J]. *The Journal of Geology*, 94(5): 635–650.
- Sun S S and McDonough. 1989. Chemical and isotopic systematics in Ocean Basalt: Implication for mantle composition and process[C]//Saunders A D, Norry M J(eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, (42): 313–345.
- Tian Jingchun, Zhang Xiang. 2016. *Sedimentary Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 48–49(in Chinese).
- Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen. 1987. *The Plot for Recovering Protoliths of Metamorphic Rocks*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 5–6(in Chinese).
- Wang Shiyan, Peng Songmin, Ma Ruishen, Zhang Yanqi, Lv Jigen, Bai Guodian, Xie Chaoyong, Gao Tingchen, Ren Jiande, Liu Pinde, Yang Junfeng, Fang Huanbin, Li Chunyan, Lv Xianhe, Li Xiangzi, Yang Ruixi, Du Fengjun, Pang Yunchao, Zhang Gehong. 2014. *The People's Republic of China Regional Geological Report: Kuketulu map(J43C003002), Taxkorgan map(J43C003003): Scale 1: 250000*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 252–272 (in Chinese).
- Wang Xiaowei, Xu Xueyi, Ma Zhongping, Chen Juanlu, Zhu Xiaohui, Sun Jiming, Cui Fanglei. 2015. Geochemical characteristics of the Late Carboniferous bimodal volcanic rocks in Jijitai area, eastern Bogda orogenic belt, and their geological significance[J]. *Geology in China*, 42(3): 553–569(in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Qian Qing, Liu Liang, Zhangqi. 2000. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic Rocks in different geochemical environments[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 169–173(in Chinese with English abstract).
- Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. 2001. Th/Hf–Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 413–421(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuzhen. 1985. *Geological map, 1985. Mineral Map and Introduction of Western South Xinjiang(Scale 1: 500000)* [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 3–45(in Chinese).
- Wendlandt R F, Altherr R, Neumann E R, Baldrige W S. 1995. *Petrology, Geochemistry, Isotopes*[C]//Olsen K H(ed.). *Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics*. Elsevier, 47–60.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magmas series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325–343.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77–89(in Chinese with English abstract).
- Xue Xisheng, Qiu Jiansheng. 2010. *Igneous Petrology*[M]. Beijing: Science Press, 177–178(in Chinese).
- Yan Changhai, Chen Caojun, Cao Xinzhi, Zhang Wangsheng, Chen Junkui, Li Shanpo, Liu Pinde. 2012. The discovery of the “Pamir-type” iron deposits in Taxkorgan area of Xinjiang and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(4): 549–557(in Chinese with English abstract).
- Yang Wenqiang. 2013. *The Indosinian Metamorphism, Magmatism and Formation Age of Bunlunkuole Rock Group in Taxkorgan-Kangxiwar Tectonic Belt, Western Kunlun*[D]. Xi'an: Northwest University: 1–128(in Chinese).
- Zhang Chuanlin, Lu Songnian, Yu Haifeng, Ye Min. 2007. Tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt in northern Qinghai–Tibet Plateau: Evidence from zircon SHRIMP and LA–ICP–MS U–Pb geochronology[J]. *Science in China Series D*, 37(2): 145–154(in Chinese).
- Zhang Chuanlin, Yang Chun, Shen Jialin, Wang Aiguo, Zhao Yu, Dong Yongguan, Guo Kunyi. 2003. Zircon SHRIMP age of Neoproterozoic gneissoid granites in the West Kunlun and its significance[J]. *Geological Review*, 19(3): 239–244(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shaobo. 2016. Genesis of gypsolyte–iron formation of west Kunlun–Pamir type iron deposits: A case study of Laobing iron deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 30(2): 151–156(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Santosh M., Li Houmin, Li Jianwei, Zhang Zuoheng, Song Xieyan, Wang Meng. 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 247–263.
- Zheng Mengtian, Zhang Lianchang, Zhu Mingtian, Li Zhiquan, He Lidong, Shi Yujun, Dong Lianhui, Feng Jing. 2016. Geological characteristics, formation age and genesis of the Kalazi Ba–Fe deposit in west Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(5): 252–265 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 柴广路, 李双应. 2016. 淮阳东段佛子岭群变质岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地学前缘*, 23(4): 29–45.
- 陈登辉, 伍跃中, 李文明, 王兴安, 乔耿彪, 赵晓健. 2013. 西昆仑塔什库尔干地区磁铁矿矿床特征及其成因[J]. *大地构造与成矿学*, 37(4): 671–684.
- 陈俊魁, 燕长海, 张旺生, 高廷臣, 吕宪河, 张哨波, 胡小川. 2011. 新疆塔什库尔干地区磁铁矿床地质特征与找矿方向[J]. *地质调查与研究*, 34(3): 179–189.
- 储雪蕾. 2004. 新元古代的“雪球地球”[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 23(3): 233–238.
- 董连慧, 冯京, 庄道泽, 李凤鸣, 区迅, 刘德权, 唐延龄. 2011a. 新疆富铁矿成矿特征及主攻类型成矿模式探讨[J]. *新疆地质*, 29(4): 416–422.
- 高晓峰, 校培喜, 康磊, 朱海平, 过磊, 奚仁刚, 董增产. 2013. 新疆塔什库尔干塔阿西一带火山岩成因及地质意义[J]. *地球科学(中国*

- 地质大学学报), 38(6): 1169-1182.
- 胡建卫, 庄道泽, 杨万志. 2010. 新疆西南部塔什库尔干地区赞坎铁矿综合信息预测模型及其在区域预测中的应用[J]. 地质通报, 29(10): 1495-1503.
- 黄朝阳. 2014. 西昆仑布伦阔勒群铁矿床地质特征及成因研究[D]. 北京: 中国科学院大学: 1-108.
- 计文化, 李荣社, 陈守建, 何世平, 赵振明, 边小卫, 朱海平, 崔继岗, 任娟刚. 2011. 甜水海地块古元古代火山岩的发现及其地质意义[J]. 中国科学(D辑), 41(9): 1268-1280.
- 姜春发, 王宗起, 李锦铁. 2000. 中央造山带开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 1-154.
- 李荣社, 计文化, 杨永成, 于浦生, 赵振明, 陈守建, 孟勇, 潘小平, 史秉德, 张维吉, 李行, 洛长义. 2008. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 68-127.
- 李智泉, 张连昌, 薛春纪, 郑梦天, 郝延海, 石玉君. 2015. 西昆仑赞坎铁矿地质和地球化学特征及矿床类型探讨[J]. 地质科学, 50(1): 100-117.
- 刘建平, 王核, 任广利, 付王伟, 吴玉峰. 2009. 西昆仑铁矿矿床类型及勘探前景[J]. 矿物学报, 29(S1): 439-441.
- 刘品德. 2014. 西昆仑塔什库尔干地区老并石膏磁铁矿地质特征及成矿作用过程探讨[J]. 西北地质, 47(4): 227-236.
- 刘品德, 燕长海, 张哨波, 陈俊魁, 廖诗进, 赵建敏, 陈雷, 张戈红, 杨瑞西, 杨凡, 李山坡, 吕国营, 曹文友, 刘颖, 张铁林, 刘家橘, 陈宏民, 张建军, 刘传权, 程国安, 于雷. 2012. 新疆西昆仑塔什库尔干地区铁铅锌矿远景调查报告[R]. 郑州: 河南地质调查院, 22-81.
- 刘宇, 匡爱兵, 张静. 2011. 新疆塔什库尔干县老并赞坎塔吐鲁沟一带铁矿床地质特征及成因浅析[J]. 矿物学报, 31(S1): 373-375.
- 刘振涛, 杨海波, 王跃武, 张妙红, 赵雪莲. 2000. 1:50000下拉夫迭、班迪尔幅区域地质调查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆地质调查院, 13-17.
- 潘裕生, 文世宣, 孙东立. 2000. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化[M]. 北京: 科学出版社, 1-523.
- 裴国栋, 弓小平, 马华东, 关传硕, 杜韦强, 刘洋洋, 欧阳承钊, 李晓光. 2018. 阿尔泰造山带喀纳斯群变质岩地球化学特征及其形成环境[J]. 中国地质, 45(1): 141-154.
- 乔耿彪, 王萍, 伍跃中, 郝延海, 赵晓健, 陈登辉, 吕鹏瑞, 杜玮. 2015. 西昆仑塔什库尔干陆块赞坎铁矿赋矿地层形成时代及其地质意义[J]. 中国地质, 42(3): 616-630.
- 邱家骧, 林景任. 1991. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社, 261-263.
- 田景春, 张翔. 2016. 沉积地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 48-49.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珠. 1987. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 5-6.
- 王世炎, 彭松民, 马瑞申, 张彦启, 吕际根, 白国典, 谢朝勇, 高廷臣, 任建德, 刘品德, 杨俊峰, 方怀宾, 李春艳, 吕宪河, 李香资, 杨瑞西, 杜凤军, 庞运超, 张戈红. 2014. 中华人民共和国区域地质调查报告. 克克吐鲁克幅幅(J43C003002)、塔什库尔干塔吉克自治县幅(J43C003003): 比例尺 1:25万[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 252-272.
- 汪晓伟, 徐学义, 马中平, 陈隽璐, 朱小辉, 孙吉明, 崔方磊. 2015. 博格达造山带东段芨芨台子地区晚石炭世双峰式火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 42(3): 553-569.
- 王焰, 钱青, 刘良, 张旗. 2000. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征[J]. 岩石学报, 16(2): 169-173.
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf图解判别[J]. 岩石学报, 17(3): 413-421.
- 汪玉珍. 1985. 1:500 000 新疆南疆西部地质图、矿产图及说明书[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 3-45.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 77-89.
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 177-178.
- 燕长海, 陈曹军, 曹新志, 张旺生, 陈俊魁, 李山坡, 刘品德. 2012. 新疆塔什库尔干地区“帕米尔式”铁矿床的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 31(4): 549-557.
- 杨文强. 2013. 西昆仑塔县-康西瓦构造带印支期变质、岩浆作用及布伦阔勒岩群的形成时代[D]. 西安: 西北大学: 1-128.
- 张传林, 陆松年, 于海锋, 叶海敏. 2007. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据[J]. 中国科学: D辑, 37(2): 145-154.
- 张传林, 杨淳, 沈加林, 王爱国, 赵宇, 董永观, 郭坤一. 2003. 西昆仑北缘新元古代片麻状花岗岩锆石 SHRIMP 年龄及其意义[J]. 地质评论, 19(3): 239-244.
- 张哨波. 2016. 西昆仑帕米尔式铁矿床膏铁建造成因探讨——以老并铁矿为例[J]. 矿产与地质, 30(2): 151-156.
- 郑梦天, 张连昌, 朱明田, 李智泉, 何立东, 石玉君, 董连慧, 冯京. 2016. 西昆仑喀来子钼-铁矿床地质特征、时代及成因探讨[J]. 地质前缘, 23(5): 252-265.