

· 专题研究 ·

柴北缘托莫尔日特地区变基性火山岩年代学、 地球化学特征及地质意义

王振强^{1,2}, 张照伟³, 丁培超^{1,2}, 冯建之¹, 薛志强^{1,2}, 吕达鑫¹

(1. 河南省地质矿产勘查开发局 第一地质矿产调查院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南省金银多金属成矿系列与深部预测重点实验室, 河南 洛阳 471023; 3. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

摘要: 托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带位于柴北缘结合带东段, 对该蛇绿混杂岩带中的变火山岩进行了系统的年代学及岩石地球化学研究。结果表明, 变基性火山岩 SiO_2 含量为 47.78%~50.01%, MgO 含量为 4.52%~9.36%, $^{\text{T}}\text{FeO}$ 含量为 8.00%~14.94%, K_2O 含量为 0.04%~0.80%, Na_2O 含量为 1.02%~4.20%, 具典型的拉斑玄武质岩浆特征。微量元素上表现出轻稀土元素弱亏损, 富集大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta 等高场强元素特征, 表明该基性岩很可能形成于弧后盆地环境。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示, 变基性火山岩年龄为 480.1 ± 1.8 Ma。综合区域地质资料, 认为原特提斯洋在早奥陶世已经开始了俯冲消减作用。

关键词: 变基性火山岩; SSZ 型蛇绿岩; 锆石 U-Pb 测年; 地球化学; 柴北缘

中图分类号: P588.41; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)03-0491-13

Geochronology, geochemistry and significance of the metabasic volcanic rocks in Tuomoerrite area, North Qaidam

WANG Zhen-qiang^{1,2}, ZHANG Zhao-wei³, DING Pei-chao^{1,2}, FENG Jian-zhi¹, XUE Zhi-qiang^{1,2} and LÜ Da-xin¹

(1. No. 1 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan, Luoyang 471023, China; 2. Key Laboratory of Gold and Silver Polymetallic Mineralization Series and Deep Prediction of Henan, Luoyang 471023, China; 3. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: Tuomoerrite ophiolitic mélange is located in the eastern segment of the northern margin of Qaidam terrane. This paper presents a systematic geochronological and petrogeochemical study of the meta-basaltic rocks in the ophiolite mélange. The metabasalts have whole-rock SiO_2 contents of 47.78%~50.01%, MgO contents of 4.52%~9.36%, $^{\text{T}}\text{FeO}$ contents of 8.00%~14.94%, K_2O contents of 0.04%~0.80%, and Na_2O contents of 1.02%~4.20%, resembling those features of tholeiitic magma. They show slightly depletion in LREE, enrichment in LILE and LREE, and depletion in HFSE, similar to the patterns of arc-related volcanic rocks. These features collectively suggest a back-arc setting for the meta-basalts. The zircon U-Pb age of these metabasalts determined by LA-ICP-MS is 480.1 ± 1.8 Ma, suggesting that the expansion time of the back-arc basin in this area should be around 480 Ma, and the oceanic slab subduction occurred in Early Ordovician.

Key words: metabasic volcanic rocks; SSZ ophiolite; zircon U-Pb dating; geochemistry; North Qaidam

Fund support: Project of China Geological Survey (12120114018216, 121201011000150005-12)

收稿日期: 2020-12-13; 接受日期: 2021-12-31; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国地质调查局项目 (12120114018216, 121201011000150005-12)

作者简介: 王振强 (1987-), 男, 工程师, 主要从事区域地质调查与研究工作, E-mail: 541496756@qq.com。

蛇绿岩作为古洋壳岩石圈残留的主要地质记录,经常与高压-超高压变质带一起出现在造山带内,是古板块汇聚边界及大陆碰撞造山带的重要标志(史仁灯, 2005; 王成善等, 2005; 孙立新等, 2017)。柴北缘加里东期造山带内发育典型的蛇绿岩和低温高压变质岩石组合,记录了地壳物质从俯冲到构造折返的动力学过程,提供造山带演化的重要信息,一直是国内研究的热点之一(杨经绥等, 2001; Yang *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2006; Song *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2009; 宋述光等, 2011; 张贵宾等, 2012)。柴北缘加里东期造山带中的蛇绿岩根据野外产出状态可分为两类: ① 产于柴北缘高压-超高压变质带中的蛇绿岩岩块,与榴辉岩(榴闪岩)一起经历了高压-超高压变质作用,包括蛇纹石化辉橄榄岩、条带状超镁铁质到辉长质堆晶岩、原岩岩性为 MORB 的榴辉岩(张贵宾等, 2005; Zhang *et al.*, 2008),它们代表了俯冲的原特提斯洋主洋盆的残骸(夏林圻等, 2016); ② 产于滩间山群中的蛇绿岩块,主要由蛇纹石化橄榄岩、蚀变辉长岩、堆晶岩及辉绿辉长岩墙群组成。它们在空间上与岛弧火山岩伴生,可能形成于削减带之上,属 SSZ 型蛇绿岩(王惠初等, 2003; 朱小辉等, 2014)。

托莫尔日特地区的蛇绿岩,出露相对完整的岩石序列,包括变质橄榄岩类、超镁铁质岩-镁铁质岩类、大洋斜长花岗岩、变玄武岩和放射虫硅质岩,形成于有限洋盆环境(韩英善等, 2000)。孙延贵等(2000)根据托莫尔日特地区蛇绿岩与大洋岩石圈之间的显著差异,认为托莫尔日特蛇绿岩不具备典型的洋壳特征,而是形成于陆壳基础之上,即形成于裂谷阶段的一种似蛇绿岩组合。因此,柴北缘托莫尔日特-赛坝沟蛇绿岩的构造属性与形成环境等问题,尚未形成统一的认识。本次研究在详细野外调查的基础上,以托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带内变基性火山岩为研究对象,结合岩石学、地球化学、同位素年代学等工作手段,探讨其构造属性与形成环境等问题,为研究柴北缘东段洋-陆汇聚作用时限和机制提供重要资料。

1 区域地质背景

柴北缘结合带位于青藏高原的东北边缘,北侧为全吉地块,南侧为柴达木地块,东起青海省都兰县的沙柳河,向西经德令哈、锡铁山、鱼卡、达肯大坂山,直至阿尔金断裂带附近的小赛什腾山,自东向西延伸超过 700 km,由滩间山岩浆弧、柴北缘蛇绿混杂岩带和鱼卡-沙柳河高压-超高压变质带等 3 个Ⅲ级构造单元组成,北部边界断裂为柴北缘断裂(潘桂棠等, 2009)。托莫尔日特蛇绿岩带位于柴北缘结合带的东部(图 1a),是柴北缘早古生代蛇绿混杂岩带的组成部分,呈狭长带状延伸约 19 km,出露宽度为 1.1~1.9 km,南侧与滩间山群变火山沉积岩系呈断层接触,北侧被早志留世同碰撞花岗岩带侵入(图 1b)。研究区内滩间山群大面积分布于赛坝沟蛇绿岩带的南侧,根据岩石组合及地球化学资料,将其分为变火山岩组和变火山-碎屑岩组,分别具有岛弧火山岩和弧后盆地火山沉积岩系的构造属性。紧邻赛坝沟蛇绿岩带的为变火山-碎屑岩组中的变基性火山碎屑岩和硅质岩,经历了绿片岩相变质作用改造,变基性火山碎屑岩变质成为以绿帘片岩和绿泥片岩为主的绿片岩类(河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院, 2017)^①。

2 蛇绿岩带组成及变火山岩岩石学特征

2.1 蛇绿岩带组成

以中部北东-南西向冲沟为界,根据岩石组合可将蛇绿岩带划分为东西两段。西段带内岩性较为单一,主要包括由拉斑玄武岩经变质变形而成的灰绿色绿帘阳起片岩、黑色角闪片岩。东段岩石类型复杂,主要有蛇纹岩、辉石岩、辉长岩、(斜长)角闪岩、绿泥片岩、变安山岩、变砂岩等。上述岩石因受后期构造运动的破坏,各岩石单元之间均为构造接触,呈透镜状小型构造岩片形式分布在拉斑玄武岩经变质变形改造形成的糜棱岩化角闪片岩和绿片岩

① 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院. 2017. 青海省乌兰县赛坝沟地区 1:50 000 查查香卡幅(J47E020009)、托莫尔日特幅(J47E020010)区域地质矿产调查报告.

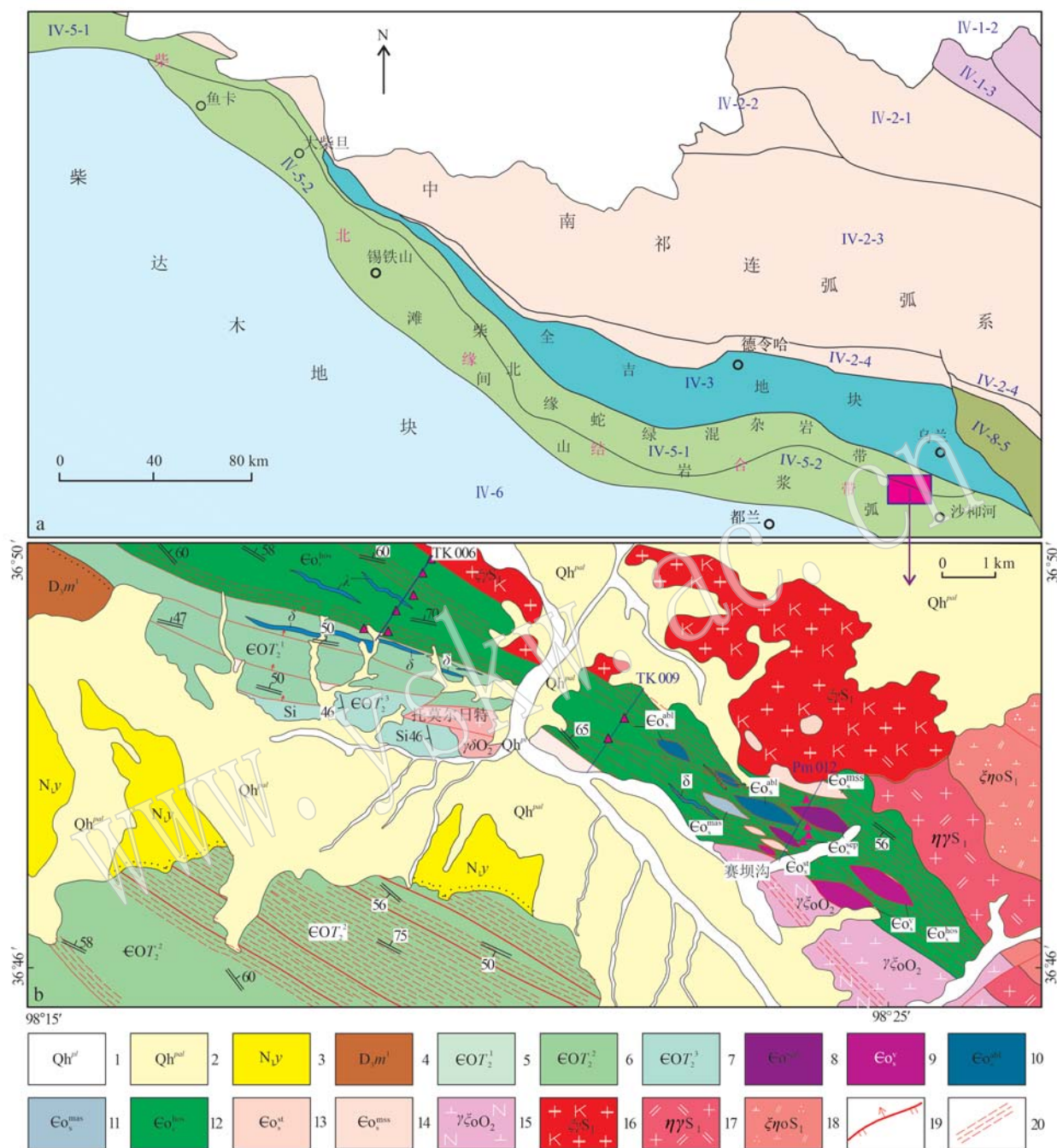


图1 托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带区域大地构造单元划分简图(a)和地质简图(b)^①

Fig. 1 Schematic diagram of division of tectonic units (a) and geological sketch (b) of ophiolite mélangé belt in Tuomoerrite-Saibagou
1—全新世冲积物; 2—全新世洪冲积物; 3—中新世油砂山组; 4—晚泥盆世牦牛山组; 5—滩间山群变火山-碎屑岩组变基性火山碎屑岩段; 6—滩间山群变火山-碎屑岩组变碎屑岩段; 7—滩间山群硅质岩段; 8—蛇纹岩; 9—辉长岩; 10—斜长角闪岩; 11—变安山岩; 12—角闪片岩; 13—变粉砂岩; 14—变砂岩; 15—中奥陶世英云闪长岩; 16—早志留世似斑状正长花岗岩; 17—早志留世二长花岗岩; 18—早志留世石英二长闪长岩; 19—糜棱岩; 20—采样位置

1—alluvial of Holocene; 2—diluvial of Holocene; 3—Youshashan Formation of Miocene; 4—Maoniushan Formation of Late Devonian; 5—metamorphic pyroclasts member in metamorphic volcanic-clastic group of Tanjianshan Group; 6—clasolite member in metamorphic volcanic-clastic group of Tanjianshan Group; 7—siliceous rock member of Tanjianshan Group; 8—serpentinite; 9—gabbro; 10—hornblende schist; 11—metamorphic andesite; 12—hornblende schist; 13—metamorphism siltstone; 14—metasandstone; 15—tonalite of Middle Ordovician; 16—porphyritic syenogranite of Early Silurian; 17—monzongranite of Early Silurian; 18—quartz monzodiorite of Early Silurian; 19—mylonite; 20—sampling location

① 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院. 2017. 青海省乌兰县赛坝沟地区 1:50 000 查查香卡幅(J47E020009)、托莫尔日特幅(J47E020010)区域地质矿产调查报告.

基质之中,弱变形岩块与强变形带呈网状分布,呈现构造混杂特点。构造岩片之间的构造接触类型包括断层接触、韧性剪切带或强劈理化带等构造界面。

2.2 变火山岩岩石学特征

托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带内变火山岩以角闪岩和斜长角闪岩为主,少量为蚀变玄武岩、绿泥石片岩、变英安岩,其分布见图1,岩石特征见图2。

(1) 黑绿色糜棱岩化绿泥石英片岩(H6TM/PM012),岩石受到强烈的构造挤压,矿物成分呈片理化定向分布。主要矿物成分为钠长石(30%~35%)、石英(10%~15%)、绿泥石(35%~40%)、绢云母(15%~20%)。石英呈不规则粒状,晶粒粒径0.05~2.50 mm不等,大部分晶粒被拉长、变形、重结晶。斜长石呈它形柱状,轻微绢云母化,长轴定向排列,粒径0.5~3.0 mm。绿泥石呈显微鳞片集合体定向分布于岩石中,片径0.01~0.15 mm。绢云母显微鳞片状集合体,与绿泥石伴生,部分分布于破碎石英晶粒间隙,大致呈定向分布。含少量的磁铁矿。

(2) 灰绿色糜棱岩化蚀变玄武岩(H36/

PM012),岩石具糜棱结构,定向构造。主要矿物成分为纤闪石(30%~35%)、绿泥石(35%~40%)、绿帘石(25%)、绢云母(2%~3%),其中纤闪石、绿泥石呈波浪状定向分布。纤闪石呈纤维状,纤维长约0.05~0.30 mm之间,主要交代原岩中的暗色矿物,部分具柱状晶形。绿泥石为显微片状,由碾磨很细的暗色矿物变质而成。绿帘石为不规则微粒状,粒径0.01~0.1 mm,多呈微粒状集合体定向分布。绢云母呈显微鳞片状,主要由基质中斜长石蚀变形成。

(3) 灰黑色角闪片岩(TK006-16、TK006-18),粒状柱状变晶结构,片状构造,岩石主要成分为角闪石(70%~75%)、石英(10%~15%)、绿帘石(5%~6%),副矿物为磁铁矿、榍石。角闪石为半自形柱状,粒径0.1~2.0 mm,长轴连续定向排列。石英它形粒状,压扁拉长,长轴定向,粒径0.5~1.0 mm。绿帘石为它形粒状,粒径0.1~0.2 mm。副矿物为少量的榍石和磁铁矿。

(4) 灰黑色斜长角闪片岩(TK009-4、TK009-10、H18-1/PM012、H23/PM012),粒状变晶结构,片状构造。主要矿物成分为角闪石(65%~70%)、斜长石

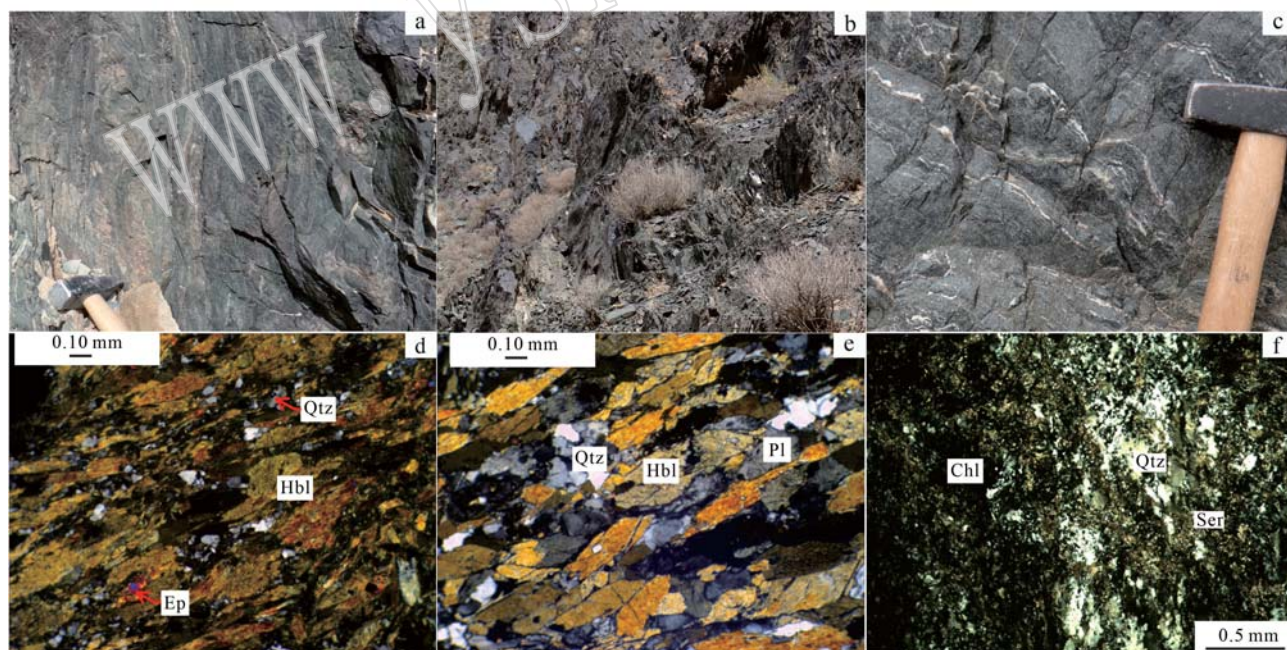


图2 托莫尔日特-赛坝沟蛇绿岩变基性火山岩组合野外特征及显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Metamorphic basic volcanic rocks and microscopic photos (crossed nicols) from Tuomoerite-Saibagou ophiolite mélange belt

a—绿泥片岩; b, c—角闪片岩; d—角闪石定向排列; e—角闪石、斜长石定向排列; f—角闪石发生绿泥石化、绢云母化; Qtz—石英;

Pl—斜长石; Hbl—角闪石; Chl—绿泥石; Ser—绢云母; Ep—绿帘石

a—chlorite schist; b, c—hornblende schist; d—the hornblendes are arranged in orientation; e—hornblende and plagioclase are arranged in orientation; f—hornblende is etched into chlorite and sericite; Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Hbl—hornblende; Chl—chlorite; Ser—sericite;

Ep—epidote

(20%~25%) 和少量石英(4%~5%)。角闪石为半自形柱状, 粒径 0.5~3.0 mm, 长轴连续定向排列。斜长石它形柱状, 轻微绢云母化, 长轴定向排列, 粒径 0.5~3.0 mm。石英为它形粒状, 压扁拉长, 长轴定向, 粒径 0.5~1.0 mm。副矿物为少量榍石和磁铁矿, 粒径 0.01~0.10 mm。

3 样品采集及分析方法

3.1 样品采集及位置

在托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带采集了 8 件相对新鲜的样品进行镜下鉴定和化学分析, 为减少岩石受变质变形作用的影响, 样品采集均优选于片岩层中的大型残留岩块的核心部位。样品分别采自托莫尔日特西(TK006)、托莫尔日特东(TK009)和石棉沟(PM12)3 个地区的 3 条调查路线或剖面上, 用于对该蛇绿混杂岩带内的基性火山岩进行横向对比分析。对其中的 H6TM/PM012 号样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年。样品坐标见表 1。

表 1 采样坐标登记表

Table 1 Sampling coordinate registration form

序号	样号	岩石名称	东经	北纬
1	TK009-4	斜长角闪糜棱片岩	98°22'07"	36°47'54"
2	TK009-10	斜长角闪岩	98°22'28"	36°48'00"
3	TK006-16	石英角闪片岩	98°19'18"	36°49'41"
4	TK006-18	石英角闪片岩	98°19'30"	36°49'49"
5	H6TM/PM012	糜棱岩化绿泥片岩	98°23'56"	36°47'36"
6	H18-1/PM012	斜长角闪片岩	98°23'31"	36°47'33"
7	H23/PM012	斜长角闪片岩	98°23'32"	36°47'25"
8	H36/PM012	变玄武岩	98°23'36"	36°47'05"

3.2 分析方法

岩石主、微量元素分析在华北有色地质勘查局燕郊中心实验室完成, 主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测试, Fe_2O_3 、FeO 采用氢氟酸-硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法测定, 分析精度优于 2%, 微量元素使用等离子体质谱仪(ICP-MS)测试, 分析精度优于 5%。

锆石单矿物挑选由河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术有限公司完成, 样品按照常规粉碎淘洗后, 经磁选和重液分离, 然后在双目镜下人工挑选纯度在 99% 以上的锆石。锆石制靶和阴极发光照相由北京铅年领航科技有限公司完成。LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在天津地质矿产研究所实验室进

行, 使用标准锆石 91500 进行分馏校正, 激光束斑直径 35 μm , 分析方法参见 Liu 等(2010), 采用 ICP-MS DataCal 程序和 Isoplot(ver3.0) 程序进行数据处理(Ludwig, 2003)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

显微镜下观察, 锆石颗粒均为无色透明, 锆石多呈长柱状, 晶体较小, 自形程度较高, 颗粒粒度一般为 30~100 μm , 柱状锆石的长宽比为 1.5:1~2.5:1。锆石阴极发光图像显示多数锆石具有清晰的韵律环带结构(图 3), 具有岩浆成因锆石的典型特征(吴元保等, 2004)。该样品中锆石无明显的继承核部, 但个别锆石颗粒发育较窄的生长边, 在进行测试时尽量避开生长边, 选择颗粒大于 30 μm 的锆石开展测年工作。样品 H6TM/PM012 测定了 35 粒锆石的 35 个测点, 分析结果见表 2, 锆石的 U 含量在 38×10^{-6} ~ 538×10^{-6} 之间, 平均值为 175×10^{-6} , 锆石的 Th/U 值在 0.1~0.7 之间。所有测点年龄较为集中, 测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 484~475 Ma。在年龄谐和图中(图 4), 数据点集中分布于谐和线上或附近, 加权平均年龄值为 480.1 ± 1.8 Ma, 代表原岩的形成时代。

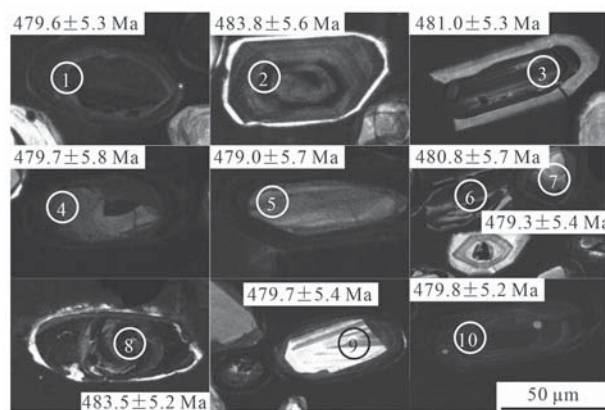


图 3 赛坝沟地区变玄武岩锆石阴极发光图像
Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircons from meta-basalt from Saibagou area

4.2 主量元素

蛇绿构造混杂岩带上不同位置采集的变玄武岩样品的主量元素差异较小(表 3、图 5a), SiO_2 含量为 47.78%~50.01%, 属于玄武岩类; 具有富钠贫钾的特点, K_2O 含量为 0.04%~0.80%, Na_2O 含量为 1.02%~

表 2 托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带变玄武岩锆石 LA-ICP-MS 定年分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon dating result for meta-basalt from Tuomoerrite-Saibagou ophiolite mélange belt

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值										年龄/Ma					
	Pb	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
1	11	149	0.2	0.077 2	0.000 9	0.604 1	0.016 3	0.056 7	0.001 5	0.015 4	0.000 3	0.239 5	0.001 1	479.6	5.3	479.8	12.9	480.7	57.3
2	5	64	0.1	0.077 9	0.000 9	0.608 2	0.037 6	0.056 6	0.003 5	0.033 1	0.001 5	0.131 4	0.000 3	483.8	5.6	482.4	29.9	475.8	137.6
3	21	292	0.2	0.077 5	0.000 9	0.606 4	0.010 6	0.056 8	0.000 9	0.017 1	0.000 2	0.178 3	0.003 4	481.0	5.3	481.3	8.4	482.9	35.7
4	12	167	0.1	0.077 2	0.000 9	0.603 9	0.019 8	0.056 7	0.001 8	0.017 9	0.000 6	0.133 3	0.001 6	479.7	5.8	479.7	15.7	480.0	68.4
5	5	59	0.6	0.077 1	0.000 9	0.600 8	0.056 4	0.056 5	0.005 4	0.017 1	0.000 3	0.091 3	0.002 4	479.0	5.7	477.7	44.9	471.6	211.3
6	28	374	0.4	0.077 4	0.000 9	0.607 8	0.011 1	0.056 9	0.000 9	0.015 1	0.000 1	0.378 4	0.001 7	480.8	5.7	482.2	8.8	488.7	35.3
7	13	171	0.2	0.077 2	0.000 9	0.602 7	0.013 7	0.056 6	0.001 2	0.020 3	0.000 4	0.206 5	0.002 0	479.3	5.4	479.0	10.9	477.3	45.0
8	20	271	0.2	0.077 9	0.000 8	0.608 1	0.016 0	0.056 6	0.001 5	0.021 7	0.000 3	0.202 1	0.000 2	483.5	5.2	482.4	12.7	477.1	57.3
9	16	214	0.2	0.077 2	0.000 9	0.603 8	0.011 9	0.056 7	0.001 0	0.017 3	0.000 2	0.228 9	0.002 5	479.7	5.4	479.6	9.5	479.6	39.5
10	42	538	0.5	0.077 3	0.000 8	0.604 0	0.008 7	0.056 7	0.000 7	0.018 5	0.000 1	0.479 2	0.000 4	479.8	5.2	479.8	6.9	479.7	27.7
11	19	242	0.5	0.077 3	0.000 9	0.604 9	0.012 2	0.056 7	0.001 1	0.020 1	0.000 2	0.454 6	0.000 9	480.3	5.6	480.3	9.6	480.6	42.1
12	7	89	0.3	0.076 5	0.000 8	0.602 7	0.017 5	0.057 1	0.001 6	0.048 5	0.000 6	0.284 9	0.001 9	475.2	5.1	478.9	13.9	496.8	61.7
13	15	200	0.1	0.077 3	0.001 1	0.603 1	0.016 9	0.056 6	0.001 4	0.023 8	0.001 0	0.114 9	0.000 9	480.1	6.9	479.2	13.4	474.6	56.6
14	8	86	0.7	0.077 4	0.001 0	0.604 0	0.042 8	0.056 6	0.004 0	0.027 7	0.000 4	0.728 7	0.002 4	480.5	5.9	479.7	34.0	476.0	156.6
15	23	287	0.4	0.077 3	0.000 8	0.604 0	0.010 9	0.056 7	0.000 9	0.026 8	0.000 2	0.398 1	0.000 9	479.9	5.1	479.8	8.6	478.9	36.5
16	19	234	0.4	0.077 4	0.000 8	0.605 0	0.012 0	0.056 7	0.001 0	0.028 6	0.000 2	0.402 0	0.000 8	480.3	5.2	480.4	9.5	480.8	40.5
17	4	46	0.6	0.077 8	0.000 9	0.606 8	0.047 0	0.056 6	0.004 3	0.032 2	0.000 6	0.627 7	0.002 6	483.0	5.9	481.5	37.3	474.4	169.3
18	11	135	0.3	0.077 5	0.000 9	0.605 6	0.017 6	0.056 7	0.001 6	0.032 7	0.000 6	0.272 7	0.001 8	481.3	5.4	480.8	13.9	478.3	62.3
19	8	104	0.2	0.077 3	0.000 8	0.603 0	0.017 5	0.056 6	0.001 6	0.034 4	0.000 9	0.155 1	0.000 7	479.9	5.2	479.1	13.9	475.5	61.9
20	5	53	0.7	0.077 3	0.001 1	0.603 1	0.064 0	0.056 6	0.006 0	0.032 0	0.000 6	0.693 8	0.000 8	480.0	6.7	479.2	50.9	475.2	234.6
21	17	234	0.2	0.077 3	0.000 9	0.605 9	0.010 9	0.056 9	0.001 0	0.022 1	0.000 2	0.202 9	0.000 9	479.8	5.4	481.0	8.6	486.7	36.9
22	17	233	0.1	0.077 4	0.000 8	0.605 1	0.010 9	0.056 7	0.000 9	0.023 3	0.000 3	0.148 2	0.002 0	480.7	5.2	480.5	8.6	479.1	36.6
23	8	101	0.3	0.077 8	0.000 9	0.607 0	0.017 5	0.056 6	0.001 6	0.025 3	0.000 3	0.284 0	0.000 6	482.9	5.4	481.7	13.9	475.9	61.9
24	10	134	0.2	0.077 4	0.000 8	0.604 3	0.016 5	0.056 6	0.001 5	0.021 6	0.000 4	0.188 3	0.001 8	480.4	5.2	480.0	13.1	477.9	58.8
25	18	229	0.4	0.077 3	0.000 9	0.606 4	0.010 1	0.056 9	0.000 9	0.020 2	0.000 1	0.365 2	0.001 0	479.8	5.3	481.3	8.0	488.4	34.4
26	14	185	0.3	0.077 3	0.000 8	0.603 0	0.011 6	0.056 5	0.001 0	0.020 0	0.000 2	0.294 8	0.000 6	480.2	5.3	479.1	9.2	474.0	39.6
27	6	77	0.2	0.077 0	0.000 9	0.602 6	0.018 3	0.056 7	0.001 7	0.038 6	0.000 7	0.204 6	0.001 6	478.3	5.3	478.9	14.5	481.8	65.8
28	8	111	0.2	0.077 4	0.000 9	0.605 5	0.018 2	0.056 7	0.001 7	0.022 0	0.000 5	0.239 0	0.000 8	480.8	5.4	480.7	14.4	480.2	64.6
29	10	134	0.2	0.077 3	0.000 8	0.602 9	0.012 8	0.056 6	0.001 1	0.038 3	0.000 5	0.175 7	0.002 2	480.1	5.1	479.1	10.2	474.3	44.2
30	22	269	0.4	0.077 4	0.000 9	0.607 9	0.010 0	0.057 0	0.000 8	0.029 9	0.000 3	0.367 9	0.007 3	480.5	5.4	482.2	7.9	490.7	32.7
31	8	101	0.2	0.077 0	0.000 9	0.602 5	0.028 7	0.056 7	0.002 7	0.034 9	0.000 9	0.228 8	0.000 6	478.3	5.3	478.8	22.8	481.7	103.4
32	3	38	0.2	0.077 1	0.001 1	0.604 1	0.057 6	0.056 8	0.005 4	0.047 9	0.002 8	0.215 9	0.000 9	479.0	6.7	479.8	45.7	483.5	209.7
33	10	125	0.2	0.077 3	0.000 8	0.604 4	0.023 5	0.056 7	0.002 2	0.028 6	0.000 6	0.231 9	0.000 7	479.7	5.1	480.0	18.7	481.4	84.1
34	16	208	0.3	0.077 3	0.000 8	0.605 5	0.013 8	0.056 8	0.001 2	0.025 0	0.000 3	0.309 8	0.001 0	480.2	5.1	480.7	10.9	483.3	47.8
35	15	191	0.3	0.076 6	0.000 8	0.602 8	0.016 5	0.057 1	0.001 5	0.023 7	0.000 5	0.311 5	0.000 6	475.7	5.0	479.0	13.1	494.8	58.3

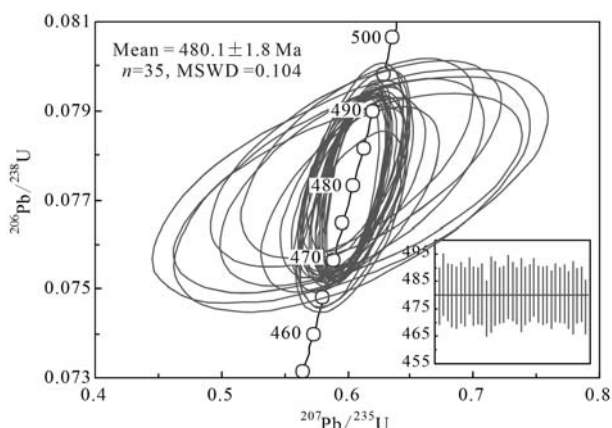


图4 托莫尔日特-赛坝沟地区变玄武岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram of zircons in meta-basalt from Tuomoerrite-Saibagou area

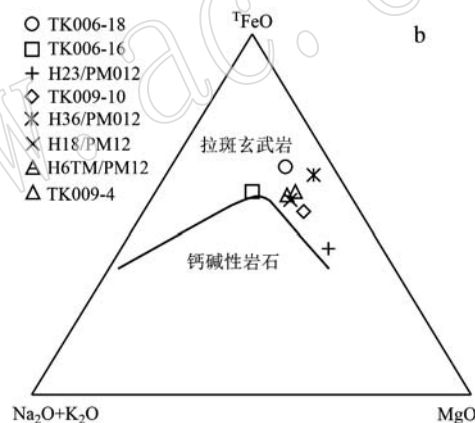
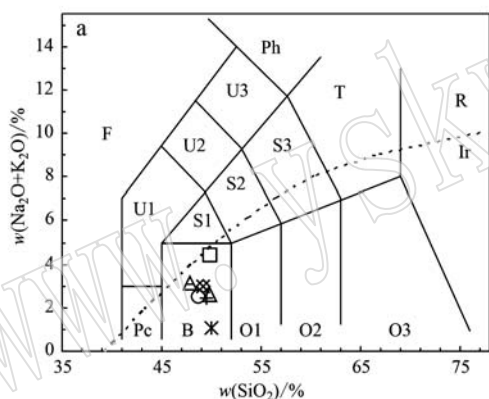


图5 托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带变火山岩 TAS 图解(a, 据 Le Maitre 等, 1989)及^TFeO-ALK-MgO 图解(b, 据 Irving and Baragar, 1971)

Fig. 5 TAS diagram(a, after Le Maitre *et al.*, 1989) and ^TFeO-ALK-MgO diagram(b, after Irving and Baragar, 1971) of meta-volcanics from Tuomoerrite-Saibagou ophiolite mélange belt

F—副长石岩; U1—碱玄岩、碧玄岩; U2—响岩质碱玄岩; U3—碱玄岩响岩; Ph—响岩; S1—粗面玄武岩; S2—玄武粗安岩; S3—粗安岩;

T—粗面岩、粗面英安岩; R—流纹岩; Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; O1—玄武安山岩; O2—安山岩; O3—英安岩

F—foidite; U1—basaltite-tephrite; U2—phonotephrite; U3—tephriphonolite; Ph—phonolite; S1—trachybasalt; S2—basaltic trachyandesite;

S3—trachyandesite; T—trachyte, trachydacite; R—rhyolite; Pc—picrobasalt; B—basalt; O1—bassaltic andesite; O2—andesite; O3—dacite

(如 Rb、Ba、U), 尤其是变英安岩中的 Rb、U、Ta 的含量达到了初始地幔值的 1 000 倍以上, 亏损高场强元素 HFSE (如 Nb、Ta、Th、Zr、Hf、P、Ti), 既有软流圈 MORB 成分特征又有俯冲带环境形成的岛弧火山岩地球化学特征的岩石; 稀土元素总量变化较大, 总体特征是轻重稀土元素不分异, 不出现 Eu 异常 (图 6)。

托莫尔日特西 TK006 剖面上的 2 件样品相对富集 Rb、U, 亏损元素 Nb; 稀土总量 $\Sigma \text{REE} = 74.4 \times 10^{-6}$

4. 20%, K₂O 含量远低于 Na₂O, Na₂O/K₂O 值为 12.36~51.22, 属于钠质火山岩; 样品中 MgO 含量较高, 含量为 4.52%~9.36%, ^TFeO 的含量为 8.00%~14.94%, 与岛弧拉斑玄武岩含量基本一致。在^TFeO-ALK-MgO 三角图解中变基性火山岩样品具有富铁演化趋势, 为拉斑系列玄武岩 (图 5b)。岩石 Mg[#] 为 28.21~53.92, 指示了岩浆喷发过程中经历了结晶分异作用, 岩石由演化的玄武岩浆形成。8 个样品的 TiO₂ 平均含量为 1.08%, 低于洋中脊玄武岩的平均值 1.5% (Bevins *et al.*, 1984)。

4.3 微量元素及稀土元素

蛇绿混杂岩带上不同地点的变基性火山岩微量元素含量差异较大 (表 3), 在原始地幔标准化微量元素图上, 总体特征是相对富集大离子亲石元素 LILE

~79.2×10⁻⁶, 轻重稀土元素基本不分馏, (La/Yb)_N = 0.89~1.37。托莫尔日特东 TK009 剖面上的 2 件样品相对富集 Ba、U、Sr、Hf, 亏损 Rb、Nb; 稀土总量 $\Sigma \text{REE} = 52.6 \times 10^{-6} \sim 66.9 \times 10^{-6}$; TK009-10 号样品轻微亏损轻稀土元素, 具有轻微“左倾”趋势, 显示 N-MORB 的特点。石棉沟 PM012 剖面上的 4 件样品相对富集 Rb、Ba、U、Sr, 明显亏损 Nb、Zr、Ti; 稀土元素总量变化较大, $\Sigma \text{REE} = 46.1 \times 10^{-6} \sim 118.7 \times 10^{-6}$, 均值为 83.6×10⁻⁶; (La/Yb)_N = 1.03~1.54。

表3 托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带变火山岩的主量($w_B/\%$)及微量($w_B/10^{-6}$)元素含量Table 3 Major element($w_B/\%$) and trace element($w_B/10^{-6}$) compositions of meta-volcanics from Tuomoerrite-Saibagou ophiolitic mélange belt

样号	TK009-4	TK009-10	TK006-16	TK006-18	H6/PM12	H18/PM012	H23/PM012	H36/PM012
岩石名称	斜长角闪糜棱片岩	斜长角闪岩	石英角闪片岩	石英角闪片岩	糜棱岩化绿泥片岩	斜长角闪片岩	斜长角闪片岩	变玄武岩
SiO ₂	49.78	49.21	49.79	48.59	47.78	49.12	49.49	50.01
TiO ₂	1.17	0.91	1.30	1.44	1.08	1.13	0.53	1.09
Al ₂ O ₃	12.31	14.15	14.35	13.14	13.11	13.16	15.65	12.81
FeO	7.88	9.11	7.85	10.45	7.26	8.57	5.52	7.46
Fe ₂ O ₃	4.07	2.43	3.65	4.49	4.85	2.64	2.48	4.19
MnO	0.22	0.24	0.19	0.23	0.18	0.22	0.15	0.20
MgO	6.86	8.41	4.52	6.23	6.67	6.65	9.36	6.42
CaO	10.12	8.86	10.69	9.66	10.92	10.80	11.02	9.83
Na ₂ O	2.51	2.85	4.20	2.34	2.93	2.72	1.63	1.02
K ₂ O	0.05	0.09	0.24	0.17	0.23	0.22	0.80	0.04
P ₂ O ₅	0.11	0.06	0.12	0.15	0.16	0.13	0.06	0.14
H ₂ O ⁺	2.14	2.11	1.12	2.19	1.85	1.45	1.78	5.23
H ₂ O ⁻	0.10	0.08	0.05	0.16	0.39	0.30	0.19	0.46
CO ₂	2.42	1.06	1.69	0.55	2.31	2.20	0.73	0.23
Ni	65.00	93.60	52.10	59.30	70.90	69.60	6.12	56.40
Ga	12.00	10.00	11.60	14.20	15.80	11.30	8.56	10.10
Sr	181.00	96.80	163.00	149.00	498.00	168.00	213.00	351.00
Bi	0.03	0.03	0.22	0.03	0.26	0.05	0.03	0.04
Th	0.35	0.57	0.87	0.37	0.62	0.71	0.50	0.64
U	0.16	0.25	0.43	0.22	0.55	0.51	0.44	0.51
Rb	0.54	2.00	5.39	10.80	14.30	7.03	38.80	4.36
Cs	0.52	1.83	1.70	0.99	3.13	1.06	1.39	0.60
Nb	3.65	1.97	5.48	4.44	3.85	3.34	2.32	4.67
Ta	0.27	0.20	0.50	0.45	0.33	0.26	0.18	0.34
Hf	3.34	2.49	2.65	2.54	2.81	1.68	1.56	2.08
Zr	80.20	50.80	88.30	87.70	66.60	54.80	29.20	68.70
Ba	120.00	59.00	92.80	100.00	310.00	133.00	307.00	43.90
Cr	99.30	220.00	55.10	74.40	188.00	134.00	458.00	68.60
V	320.00	294.00	323.00	428.00	346.00	373.00	12.10	372.00
La	3.71	2.56	5.17	3.94	6.23	4.29	3.75	7.30
Ce	9.66	5.60	13.10	10.90	16.20	11.30	8.52	19.00
Pr	1.50	0.93	1.95	1.75	2.48	1.73	1.19	2.90
Nd	8.80	5.77	10.10	9.52	13.60	9.47	5.80	15.30
Sm	2.63	1.87	2.65	2.86	4.45	3.15	1.73	4.93
Eu	0.97	0.70	0.99	1.15	1.47	1.11	0.66	1.70
Gd	3.64	3.00	3.82	4.37	5.05	3.95	2.33	6.10
Tb	0.67	0.57	0.69	0.81	0.90	0.72	0.40	1.13
Dy	4.71	3.72	4.51	5.62	6.15	4.90	2.78	7.76
Ho	0.93	0.87	0.89	1.11	1.31	1.04	0.58	1.67
Er	2.77	2.54	2.70	3.31	3.65	2.98	1.72	4.73
Tm	0.42	0.42	0.43	0.54	0.54	0.45	0.26	0.73
Yb	2.60	2.67	2.70	3.18	3.50	2.98	1.75	4.70
Lu	0.36	0.36	0.38	0.44	0.49	0.43	0.28	0.67
Y	23.50	21.00	24.30	29.70	30.10	25.00	14.30	40.10
ΣREE	66.9	52.6	74.4	79.2	96.1	73.5	46.1	118.7
(La/Yb) _N	1.02	0.69	0.89	1.37	1.28	1.03	1.54	1.11

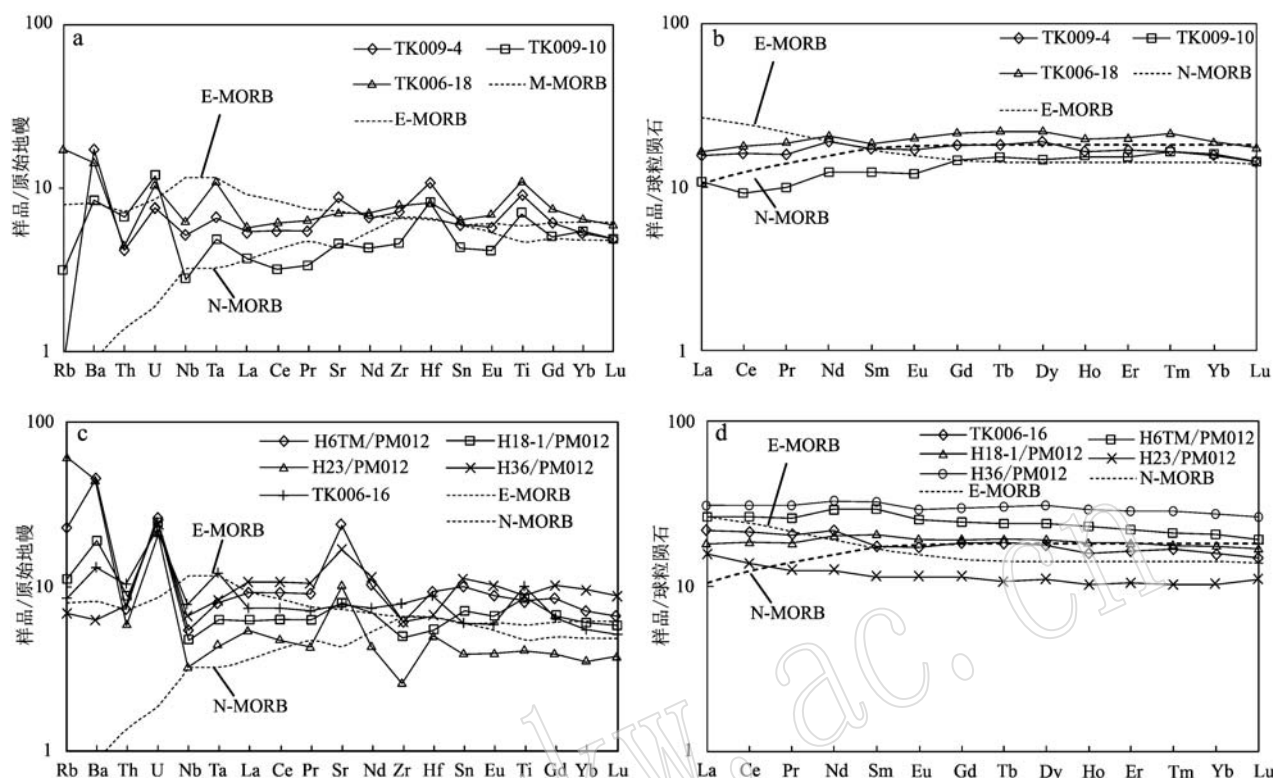


图6 托莫尔日特-赛坝沟蛇绿岩带变基性火山岩微量元素蛛网图及稀土元素配分曲线(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams and chondrite-normalized REE patterns of bimodal volcanics in the Tuomoerite-Saibagou ophiolite mélange belt (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

5 讨论

5.1 形成时代

原 1:5 万托莫尔日特幅区调报告(青海地质矿产勘查研究院, 1998)^①认为赛坝沟东南侧的花岗岩为蛇绿岩序列中的斜长花岗岩, 并获得 Rb-Sr 等时线年龄值为 447 ± 22 Ma。该套中粗粒斜长花岗岩分布面积达到了 37 km^2 , 呈大岩株形式出现在蛇绿岩带的东南端, 与典型蛇绿构造混杂岩带中的斜长花岗岩在产状及变形特征上完全不同。典型的洋中脊斜长花岗岩的特征是透镜状分布于蛇绿构造混杂岩带内, 或呈脉状侵入于辉长岩中(徐学义等, 2005; 胡培远等, 2014; 盖永升等, 2015)。并且本次在该套花岗岩中发现了大量的岩浆混合作用的标志, 并测得花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 463.2 ± 1.9 Ma(王振强, 另文发表), 时代为中奥陶世。根据该类花岗岩岩石矿物组成, 参考国际地科联推荐

的侵入岩划分方案, 称其为英云闪长岩较为合适, 并且岩石地球化学特征与陆缘弧花岗岩较为相似。朱小辉等(2015)针对托莫尔日特蛇绿岩带中的辉长岩开展了同位素年代学研究, 辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 480.1 ± 1.8 Ma。本次获得的蛇绿混杂岩带内赛坝沟地区变玄武岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 480.1 ± 1.8 Ma。托莫尔日特-赛坝沟蛇绿岩带中辉长岩与变玄武岩的锆石 U-Pb 年龄都是 480 Ma, 限定赛坝沟蛇绿岩的形成下限为早奥陶世。

5.2 构造环境

本次通过大比例尺地质填图在前人认为蛇绿岩序列上部深水沉积硅质岩中发现了“似竹叶状构造”, 此外在硅质岩沉积序列中的凝灰质砂岩中出现薄层状砾石层, 从沉积学角度判断其形成于浅水高能环境, 并非是人认为的深海沉积物(青海地质矿产勘查研究院, 1998)^①。对硅质岩进行了岩石地球化学研究, $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}$ 、REE、 Fe/Ti 、 MnO/TiO_2 等地球化学指标显示了其具热水沉积成因, 并非远

① 青海地质矿产勘查研究院. 1998. 青海省 1:50 000 托莫尔日特幅(J47E020010)、沃日格达瓦幅(J47E020011)区域地质调查报告.

洋生物成因,且形成于大陆边缘构造环境(王振强,另文发表),区内蛇绿岩缺少上部深水沉积单元。托莫尔日特-赛坝沟蛇绿构造混杂岩带南侧为本次新厘定的滩间山岩群变火山-碎屑岩组,该岩组岩性组合较为复杂,既有拉斑玄武岩、粗玄岩、粗安岩等火山岩,又有热水沉积硅质岩、火山喷气成因条带状含铁石英岩、灰岩(大理岩)、长石砂岩、凝灰质砂岩。该套变火山-碎屑岩组总体反映火山沉积相-正常沉积的岩石组合,具有弧后盆地火山沉积岩系的特征。

本次通过对西托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带开展详细的研究,对该带上的西托莫尔日特山北部、石棉沟西部、赛坝沟等3个地区变基性火山岩进行了系统的岩石地球化学研究与横向对比。该蛇绿构造混杂带上出露的角闪片岩、阳起片岩原岩主要为玄武岩,微量元素具有岛弧火山岩分布型式,而稀土元素则具有洋中脊玄武岩(N-MORB)特征(图6)。在玄武岩 $Ti/100-Zr-3 Y$ 、 $2 Nb-Zr/4-Y$ 和 $TiO_2-10 MnO-10 P_2O_5$ 构造环境判别图解中,变基

性火山岩样品均投在岛弧拉斑玄武岩范围内(图7)。与典型的大洋中脊玄武岩相比,样品富集大离子亲石元素 LILE(如 Rb、Ba、U),亏损高场强元素 HFSE(如 Nb、Ta、Th、Zr、Hf、P、Ti),又具有典型消减带岩浆特征,尤其是变英安岩中的 Rb、U、Ta 的含量达到了初始地幔值的 1 000 倍以上。这种既有软流圈 MORB 成分特征又有俯冲带环境形成的岛弧火山岩地球化学特征的岩石,通常为消减带之上的弧后盆地次级扩张形成的弧后盆地玄武岩(BABB)所特有(Xu *et al.*, 2003; 朱小辉等, 2014; 杨婧等, 2016)。而且蛇绿岩组分中的蛇纹岩、辉石岩、辉长岩、闪长岩与变基性火山岩较为相似,也具有洋中脊与岛弧火山岩的双重特点,与 Pearce 等(1984)和 Dilek 等(2003)划分的俯冲带型(SSZ)蛇绿岩特征基本一致。托莫尔日特蛇绿岩可能是形成于原特提斯洋向北俯冲导致的弧后拉张环境(图8),其不能代表柴达木地块与全吉地块之间拼合的真正界线,二者之间的缝合带应在南部的沙柳河-都兰一带,或者代表原特提斯洋的 MORB 型蛇绿岩已经俯冲消亡。

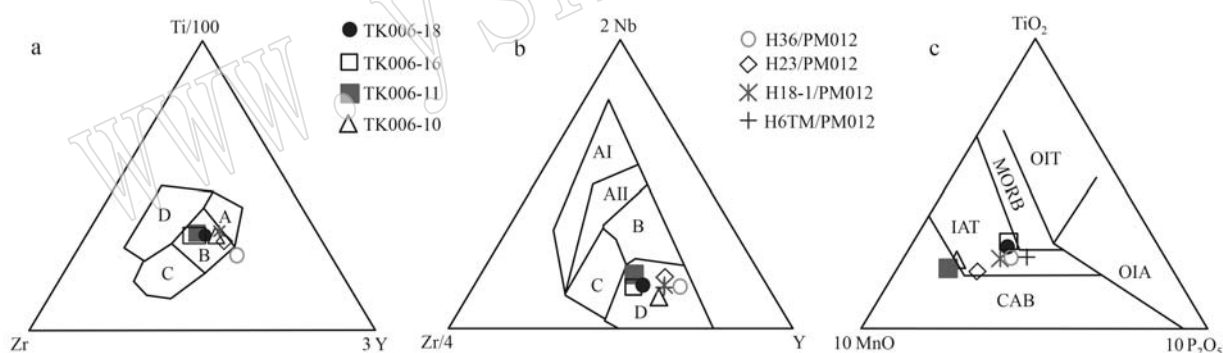


图7 托莫尔日特-赛坝沟蛇绿混杂岩带变基性火山岩 $Ti/100-Zr-3 Y$ 图解(a)、 $2 Nb-Zr/4-Y$ 图解(b)和 $TiO_2-10 MnO-10 P_2O_5$ 图解(c)

Fig. 7 $Ti/100-Zr-3 Y$ diagram(a), $2 Nb-Zr/4-Y$ diagram(b) and $TiO_2-10 MnO-10 P_2O_5$ diagram(c) for metabasic volcanic rocks from Tuomoerrite-Saibagou ophiolite mélange belt

a— $Ti/100-Zr-3 Y$ 图解(据 Pearce and Cann, 1973): A—岛弧拉斑玄武岩; B—岛弧拉斑玄武岩、钙碱性玄武岩和 MORB; C—钙碱性玄武岩; D—板内玄武岩; b— $2 Nb-Zr/4-Y$ 图解(据 Meschede, 1986): A I—板内碱性玄武岩; A II—板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩; B—E-MORB; C—板内拉斑玄武岩和火山玄武岩; D—N-MORB 和火山弧玄武岩; c— $TiO_2-10 MnO-10 P_2O_5$ 图解(据 Mullen, 1983): MORB—洋中脊玄武岩; OIT—洋岛拉斑玄武岩或海山拉斑玄武岩; OIA—洋岛碱性玄武岩和海山碱性玄武岩; CAB—岛弧钙碱性玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩

a—the illustration of $Ti/100-Zr-3 Y$ (after Pearce and Cann, 1973): A— island arc tholeiite; B— island arc tholeiite, calc-alkalic basalt and MORB; C— calc-alkalic basalt; D— intraplate basalt; b—the illustration of $2 Nb-Zr/4-Y$ (after Meschede, 1986): A I— intraplate alkali basalt; A II— intraplate alkali basalt and intraplate tholeiite; B— E-MORB; C— intraplate tholeiite and igneous basalt; D— N-MORB and island arc basalt; c—the illustration of $TiO_2-10 MnO-10 P_2O_5$ (after Mullen, 1983): MORB— mid-ocean ridge basalt; OIT— ocean island tholeiite; OIA— ocean island alkali basalt; CAB— island arc calc-alkalic basalt; IAT— island arc tholeiite

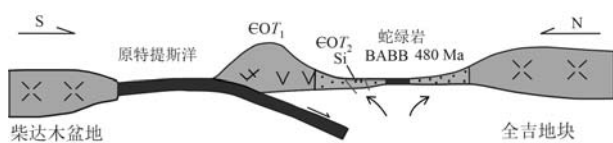


图8 早奥陶世托莫尔日特地区大地构造模式图
Fig. 8 The tectonic pattern of Tomoerrite in the Early Ordovician

BABB—弧后盆地玄武岩； $\in OT_1$ —滩间山群变火山组； $\in OT_2$ —滩间山群变火山-碎屑岩组变碎屑岩段；Si—硅质岩
BABB—basalt of backarc basin； $\in OT_1$ —metamorphic pyroclasts group of Tanjianshan group； $\in OT_2$ —metamorphic volcanic-clastic group of Tanjianshan group；Si—siliceous rock

6 结论

托莫尔日特-赛坝沟地区变玄武岩具有弧后盆地拉斑玄武岩的地球化学特征，代表了早古生代洋陆转换过程中弧后盆地扩张脊岩浆活动的产物，属于弧后盆地型蛇绿岩的组成部分。测得赛坝沟地区变基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 480.1 ± 1.8 Ma，其形成时代为早奥陶世，可能表明原特提斯洋初始俯冲时间应早于 480 Ma。

致谢 感谢中国地质调查局天津地质调查中心实验室周红英教授级高工、郝爽工程师在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年中提供的帮助；在成文过程中与中国地质调查局西安地质调查中心贾群子教授级高工和青海地质调查院王毅智教授级高级工程师进行过有益的讨论，在此表示感谢。

References

Bevins R E, Kokelaar B P and Dunkley P N. 1984. Petrology and geochemistry of lower to middle Ordovician igneous rocks in Wales: A volcanic arc to marginal basin transition[J]. *Proceedings of the Geologists Association*, 95: 337~347.

Dilek Y and Robinson P T. 2003. Ophiolite in earth history: Introduction [J]. *Geological Society London Special Publications*, 218(1): 1~8.

Gai Yongsheng, Liu Liang, Kang Lei, *et al.* 2015. The origin and geologic significance of plagiogranite in ophiolite belt at North Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2 549~2 565 (in Chinese with English abstract).

Han Yingshan and Peng Chen. 2000. Geological characteristics of Tuo-

muoerrite ophiolite mélangé belt and its tectonic significance [J]. *Qinghai Geology*, 1: 18~25 (in Chinese with English abstract).

Hu Peiyuan, Li Cai, Wu Yanwang, *et al.* 2014. The Silurian Tethyan Ocean in central Qiangtang, northern Tibet: Constraints from zircon U-Pb ages of plagiogranites within the Taoxinghu ophiolite [J]. *Geological Bulletin of China*, 33(11): 1 651~1 661 (in Chinese with English abstract).

Irvine N T and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523~548.

Le Maitre R W B, Dudek P, Keller A, *et al.* 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union [M]. Blackwell Scientific.

Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51: 537~571.

Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot/EX, Version 3.00. Geochronological toolkit for Microsoft excel [J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 1~70.

Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chemical Geology*, 56(3~4): 207~218.

Mullen E D. 1983. MnO-TiO₂-P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 62(10): 53~62.

Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, *et al.* 2009. Subdivision of tectonic units in China [J]. *Geology in China*, 36(1): 1~28 (in Chinese with English abstract).

Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290~300.

Pearce J A, Lippard S J and Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites [A]. Kokelaar B P and Howells M F. *Marginal Basin Geology* [C]. Geological Society of London Special Publication 16: London, Blackwell Scientific Publications, 77~94.

Shi Rendeng. 2005. Comment on the progress in and problems on the ophiolite study [J]. *Geological Review*, 51(6): 681~693 (in Chinese with English abstract).

Song Shuguang, Zhang Cong, Li Xianhua, *et al.* 2011. HP/UHP metamorphic time of eclogite in the Xitieshan terrane, North Qaidam UHP belt, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1 191~

- 1 197(in Chinese with English abstract).
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L, *et al.* 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data[J]. *Journal of Petrology*, 47: 435~455.
- Sun Lixin, Zhang Jiahui, Ren Bangfang, *et al.* 2017. Geochemical characteristics and U-Pb age of Baiyunshan ophiolite mélangé in the Beishan orogenic belt and their geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 131~147(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Sun Yangui, Hao Weijie, Han Yingshan, *et al.* 2000. Characteristics of the Tomorit ophiolite-like assemblage in the eastern sector of the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Regional Geology of China*, 19(3): 258~264(in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan, Li Yalin, Liu Zhifei, *et al.* 2005. Yarlung-Zangbo ophiolites revisited: From geological survey to mineral records [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 323~330(in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Lu Songnian, Yuan Guibang, *et al.* 2003. Tectonic setting and age of the "Tanjianshan Group" on the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(7): 487~493(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Li Xiangmin, Yu Jiyan, *et al.* 2016. Mid-Late Neoproterozoic to early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian mountain[J]. *Geology in China*, 43(4): 1 087~1 138(in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Castillo P R, Chen F R, *et al.* 2003. Geochemistry of Late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, Northwest China: Implication for back-arc mantle evolution[J]. *Chemical Geology*, 193(1~2): 137~154.
- Xu Xueyi, Ma Zhongping, Xia Linqi, *et al.* 2005. SHRIMP dating of plagiogranite from Bayingou ophiolite in the northern Tianshan mountains[J]. *Geological Review*, 51(5): 523~527(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Yang J S, Wu C L, *et al.* 2006. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Northern Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 160~173.
- Yang Jing, Wang Jinrong, Zhang Qi, *et al.* 2016. Back-arc basin basalt (BABB) data mining: Comparison with MORB and IAB[J]. *Advances in Earth Science*, 31(1): 66~77(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqin, *et al.* 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam early Paleozoic ultrahigh-high pressure (UHP-HP) metamorphic belt, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175~179(in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Xu Z Q, Song S G, *et al.* 2002. Subduction of continental crust in the early palaeozoic North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt, NW China: Evidence from the discovery of coesite in the belt[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 76: 63~68.
- Zhang Guibin, Song Shuguang, Zhang Lifei, *et al.* 2005. Ophiolite-type mantle peridotite from Shaliuhe, North Qaidam UHPM belt, NW China and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1 049~1 058(in Chinese with English abstract).
- Zhang G B, Song S G, Zhang L F, *et al.* 2008. The subducted oceanic crust within continental-type UPH metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology[J]. *Lithos*, 104: 99~108.
- Zhang Guibin, Zhang Lifei and Song Shuguang. 2012. An overview of the tectonic evolution of North Qaidam UHPM belt: From oceanic subduction to continental collision[J]. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 28~40(in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Mattinson G G, Meng F C, *et al.* 2009. U-Pb geochronology of paragneisses and metabasite in the Xitieshan area, north Qaidam Mountains, western China: Constraints on the exhumation of HP/UHP metamorphic rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 245~258.
- Zhu Xiaohui, Chen Danling, Liu Liang, *et al.* 2014. Geochronology, geochemistry and significance of the Early Paleozoic back-arc type ophiolite in Lvliangshan area, North Qaidam[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 822~834(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaohui, Chen Danling, Wang Chao, *et al.* 2015. Geochronology, geochemistry and significance of the Early Paleozoic back-arc type ophiolite in Lvliangshan area, North Qaidam[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 89(2): 234~251(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 盖永升, 刘良, 康磊, 等. 2015. 北阿尔金蛇绿混杂岩带中斜长花岗岩的成因及其地质意义[J]. *岩石学报*, 31(9): 2 549~2 565.

- 韩英善, 彭琛. 2000. 托莫尔日特蛇绿混杂岩带地质特征及其构造意义[J]. 青海地质, 1: 18~25.
- 胡培远, 李才, 吴彦旺, 等. 2014. 藏北羌塘中部存在志留纪洋盆——来自桃形湖蛇绿岩中斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄证据[J]. 地质通报, 33(11): 1 651~1 661.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1~28.
- 史仁灯. 2005. 蛇绿岩研究进展、存在问题及思考[J]. 地质论评, 51(6): 681~693.
- 宋述光, 张聪, 李献华, 等. 2011. 柴北缘超高压变质带中锡铁石榴辉岩的变质时代[J]. 岩石学报, 27(4): 1 191~1 197.
- 孙立新, 张家辉, 任邦方, 等. 2017. 北山造山带白云山蛇绿混杂岩的地球化学特征、时代及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 36(2): 131~147.
- 孙延贵, 郝维杰, 韩英善, 等. 2000. 柴达木盆地北缘东段托莫尔日特似蛇绿岩岩石组合特征[J]. 中国区域地质, 19(3): 258~264.
- 王成善, 李亚林, 刘志飞, 等. 2005. 雅鲁藏布江蛇绿岩再研究: 从地质调查到矿物记录[J]. 地质学报, 79(3): 323~330.
- 王惠初, 陆松年, 袁桂邦, 等. 2003. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成环境[J]. 地质通报, 22(7): 487~493.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589~1 604.
- 夏林圻, 李向民, 余吉远, 等. 2016. 祁连山新元古代中-晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. 中国地质, 43(4): 1 087~1 138.
- 徐学义, 马中平, 夏林圻, 等. 2005. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩锆石 SHRIMP 测年及其意义[J]. 地质论评, 51(5): 523~527.
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 2001. 柴达木盆地北缘早古生代高压-超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英[J]. 地质学报, 75(2): 175~179.
- 杨婧, 王金荣, 张旗, 等. 2016. 弧后盆地玄武岩(BABB)数据挖掘: 与 MORB 及 IAB 的对比[J]. 地球科学进展, 31(1): 66~77.
- 张贵宾, 宋述光, 张立飞, 等. 2005. 柴北缘超高压变质带沙柳河蛇绿岩型地幔橄榄岩及其意义[J]. 岩石学报, 21(4): 1 049~1 058.
- 张贵宾, 张立飞, 宋述光. 2012. 柴北缘超高压变质带: 从大洋到大陆的深俯冲过程[J]. 高校地质学报, 18(1): 28~40.
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 等. 2014. 柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义[J]. 岩石学报, 30(3): 822~834.
- 朱小辉, 陈丹玲, 王超, 等. 2015. 柴达木盆地北缘新元古代-早古生代大洋的形成、发展和消亡[J]. 地质学报, 89(2): 234~251.