

# 新疆博格达白杨沟的枕状熔岩:岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征

熊发挥<sup>1</sup> 杨经绥<sup>1</sup> 贾 毅<sup>2</sup> 徐向珍<sup>1</sup>

陈松永<sup>1</sup> 李天福<sup>1</sup> 任玉峰<sup>1</sup> 左国朝<sup>3</sup>

(1. 大陆构造与动力学国家重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京 100037;2. 中国测绘科学研究院,北京 100830;3. 甘肃地质调查院,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**新疆博格达造山带北段东侧白杨沟地区分布有大面积的晚石炭世至早二叠世的火山岩,岩石主要由亚碱性玄武岩和安山岩组成,其中分布有大量保存极好的枕状熔岩。枕状熔岩主要为基性熔岩, SiO<sub>2</sub> 含量 50.17%~54.66%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 13.10%~16.44%, MgO 为 4.62%~7.89%, TiO<sub>2</sub> 为 1.23%~2.79%, CaO 为 7.06%~13.07%, Na<sub>2</sub>O 为 2.76%~4.99%, K<sub>2</sub>O 为 0.07%~0.82%。基性熔岩的大离子亲石元素 (LILE) 一组为富集如 Rb 和 Ba, 另一组相对亏损;高场强元素 (HFSE) 如 Nb 和 Ta 在 N-MORB 标准化图解上都具有明显的负异常。熔岩的稀土元素在球粒陨石标准化配分图解中表现为总体平坦,轻稀土元素 (LREE) 轻微富集的右倾曲线,  $\delta \text{Eu}$  为 0.89~1.12。从 Sr-Nd-Pb 同位素组成来看,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 +2.8~+3.1,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_0$  为 0.512407~0.512422,  $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$  为 -14.0~-17.5,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_0$  为 0.70293~0.70317,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}_0$  为 17.622~17.835,  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}_0$  为 15.374~15.463,  $^{208}\text{Pb}/^{234}\text{Pb}_0$  为 38.163~38.339, 具有亏损地幔端元的特征。本区火山岩在构造环境图解上具有 MORB 与 WPB 的特点,综合区域地质资料和前人研究成果,推断研究区晚石炭世—早二叠世火山岩可能来源于亏损地幔源区,是在古亚洲洋关闭过程中主动大陆边缘的弧后盆地环境形成。

**关键词:**枕状熔岩;岩石地球化学;Sr-Nd-Pb 同位素;亏损地幔;弧后盆地;白杨沟

**中图分类号:** P588.14; P597.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2011)04-0838-17

天山山脉绵延耸立于中亚腹地,处于北部西伯利亚地块与南部塔里木地块、华北地块(中朝地块)之间,是亚洲主要的、规模巨大的年轻山脉之一,被认为是发育在前寒武纪结晶基底之上,经历了古生代塔里木板块、准噶尔板块、哈萨克斯坦板块和多个微陆块以及火山岛弧之间的多期俯冲-碰撞-拼贴增生造山作用的产物<sup>[1-3]</sup>。在早石炭世早期,古生代洋盆相继闭合<sup>[4]</sup>,板块缝合带成为一个地壳增厚的地区,发生区域性上隆,并相应产生复杂的构造和岩浆活动(图 1)。夏林圻等<sup>[5,9]</sup>认为广泛的区域性上隆及与之相伴的部分熔融事件导致在天山及相邻地区产生石炭纪—早二叠世“天山(中亚)大火成岩省”。在这个大火成岩省中,除了大规模火山活动外,还广泛发育同时代的花岗质

岩浆和基性-超基性岩浆的侵入。

对于天山及邻区石炭纪—二叠纪期间的构造属性,主要存在着两种截然不同的认识,即地壳伸展(裂陷)<sup>[7-13]</sup>与板块汇聚挤压(岛弧)<sup>[14-21]</sup>。近年来,韩宝福等<sup>[22]</sup>又提出了幔源岩浆底垫、地壳纵向增生的不同认识。博格达造山带处于天山东段北部地区,对于晚古生代博格达造山带的构造属性也存在两种不同的认识:①依据该区发育的钙碱性系列火山岩、火山碎屑岩建造,认为博格达地区为晚古生代的火山岛弧<sup>[15,19-20,24]</sup>,或弧后盆地<sup>[25]</sup>;②晚古生代的裂谷系、陆间裂谷<sup>[8,26]</sup>、裂陷槽或坳拉谷<sup>[7,10,17]</sup>。近年来在博格达山七角井发现大陆裂谷式的双峰式火山岩<sup>[11-13]</sup>,以此认为博格达地区在晚古生代为大陆裂谷构造环境<sup>[13]</sup>。上

收稿日期:2011-05-05;改回日期:2011-06-17

基金项目:中国石化海相前瞻性项目(YPH08110)和国土资源部公益性行业科研项目(201011034)联合资助。

作者简介:熊发挥,男,1985年生,博士,主要从事岩石学研究;E-mail: xiongfahui@126.com。



述两类十分不同的成因观点,影响到对东天山地区以及中亚地区的构造格局和演化历史的认识。

博格达山西段白杨沟地区发育大量巨厚枕状熔岩,其出露和保留的完好程度,在国内并不多见,是一个很经典的地质景观。其形成于什么样的地质构造背景和具有什么地质意义?却缺少相应的有关岩石学和成因探讨的文章。为此,笔者详细考察了博格达山造山带西段白杨沟地区火山岩剖面,系统地采集了一组火山岩样品,开展了岩石学、地球化学以及Sr、Nd和Pb同位素组成研究,并与邻区的研究成果进行了对比,以探讨东天山博格达地区石炭纪—早二叠世火山岩的成因、演化和构造属性。

### 1 区域地质背景

研究区博格达山白杨沟位于东天山北部,博格达山西段天池带与博格达峰之间,属博格达造山带的西缘(图2)。博格达造山带呈东-西走向,全长约600 km,处于东天山和西天山的中间地带,夹持于准噶尔和吐鲁番—哈密两个前寒武纪地块之间。其西端止于乌鲁木齐,东端在红柳峡—苏吉一带与卡拉麦里造山带相接,北为准噶尔中、新生代沉积盆地,南邻吐哈中、新生代盆地,与觉罗塔格造山带相

望。博格达造山带北缘由南向北(朝准噶尔盆地方向)形成一系列推覆构造,南缘为一系列向北倾的断裂向南推覆于吐哈盆地之上,形成一正扇形构造。造山带内主要出露石炭系海相火山-沉积岩系,二叠系主要分布在博格达山的南北麓,并在南麓还普遍发育双峰式火山岩<sup>[1,27]</sup>。博格达造山带出露的最老地层为下石炭统,但在西段未见下石炭统。上石炭统在西段地区由下至上分为柳树沟组、祁家沟组和奥尔吐组,前两者岩性主要为灰岩,夹少量的砂岩;奥尔吐组以细碎屑岩为主,夹砂质灰岩。二叠系陆相碎屑岩建造夹少量流纹岩,与下伏地层呈角度不整合接触<sup>[28]</sup>。这一带的火山岩主要为英安-流纹质熔岩和火山碎屑岩,其次为玄武岩、玄武粗安岩和粗面岩,未发现典型的安山质岩石,故认为此处是以偏酸性岩为主的双峰式火山岩建造<sup>[12]</sup>。博格达刺梅沟双峰式火山岩中玄武岩和流纹岩中测得Rb-Sr同位素等时线年龄分别为(342.0±4.2) Ma和(340.3±3.4) Ma<sup>[29]</sup>,认为新疆北部的板块碰撞发生在(300±10) Ma<sup>[30]</sup>。柴窝铺和大河沿中-酸性侵入体的等时线Rb-Sr年龄为(295.9±0.66) Ma<sup>[11]</sup>,与柴窝铺辉绿岩中锆石的<sup>206</sup>Pb-<sup>238</sup>Pb表面年龄(288.9±4.7 Ma)基本一致<sup>[31]</sup>。舒良树等<sup>[13]</sup>报道的白杨沟辉绿岩单颗粒锆石的U-Pb法

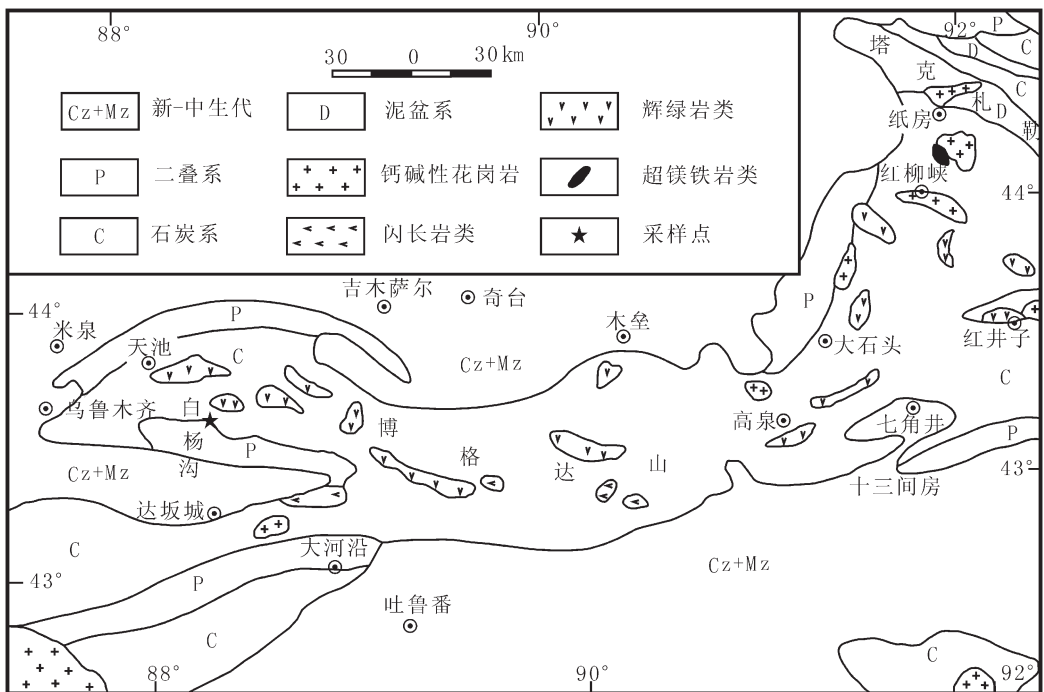


图2 研究区地质简图<sup>[11-12]</sup>  
Fig.2 Geological sketch map of the study area

测年,获得(289±5)Ma 的年龄,相当于早二叠世早期。

博格达白杨沟地区出露大面积呈带状分布的枕状中-基性熔岩、气孔状玄武岩和辉绿岩岩墙,熔岩两侧为断层控制。枕状玄武岩位于下部,宽约 250 m (厚 216 m),上部为气孔状玄武岩,宽约 80 m,并见顺层状玄武岩或辉绿岩<sup>[13,32]</sup>,枕状熔岩和气孔状熔岩单元之间呈连续过渡关系。枕状熔岩枕体大小不一,大者 60 cm,小者 10 cm,一般 40~50 cm。枕体相互叠置,密集堆积,呈山包状,颇为壮观(图 3-a、b)。枕体主要为灰绿色,部分略显微紫红(图 3-c)。熔岩有轻微热液蚀变,主要为绿泥石化、绿帘石化和碳酸盐化。断面可见数厘米厚的壳状冷凝边,并具同心状和放射状裂纹,枕体之间为凝灰质胶结。枕体内部可见气孔构造与杏仁构造(图 3-d),其大小为 2~10 mm。杏仁成分为方解石、绿泥石和少量石英。熔岩具无斑隐晶或少斑结构。斑晶以自形板状斜长石与粒状辉石为主,斜长石已蚀变,粒径多为 0.3~1.2 mm,含量一般为 5%左右。单斜辉石为短柱状,有些已绿泥石化,呈深绿色,粒径在 0.3~1.0 mm,含量为 5%~10%。熔岩中的辉绿岩岩墙延长达数百米,露头上呈暗绿-暗灰色,中细粒结构、块状构造(图 3-e)。辉绿岩的主要矿物为斜长石与辉石,均较新鲜。

## 2 岩相学特征

研究区岩石分为熔岩和辉绿岩两类。前者为喷出岩,后者为熔岩的通道。熔岩类又分为玄武岩和安山玄武岩,前者包括玄武岩和拉斑玄武岩。

拉斑玄武岩(图 4-a):岩石新鲜,灰黑色,无斑间粒-间隐结构,杏仁构造。主要由斜长石(45%~50%)、辉石(20%~30%)及副矿物榍石等组成。斜长石呈窄条状,半自形微晶杂乱分布,大部分被绢云母化,聚片双晶不明显,斜长石间充填火山玻璃及辉石。辉石大多为普通辉石,常伴有较强绿泥石化。杏仁体多呈不规则状,内充填方解石和石英,石英具波状消光。

玄武岩(图 4-b):岩石较新鲜,灰黑色,细粒似斑状结构,块状构造。主要由斜长石(50%~55%)、辉石(25%~35%)、橄榄石(5%~10%)和副矿物榍石、磁铁矿及少量的火山玻璃等组成。斑晶多为斜长石,呈长条状,强烈的高岭土化,偶见保留双晶。基质为间粒-间隐结构,其中斜长石微晶半定向或呈束状、放射状分布,其间有辉石、橄榄石及玻璃质充填。辉石主要

由透辉石组成,他形粒状,部分绿泥石化强烈。橄榄石呈细粒状充填于斜长石与辉石之间,伊丁石化不明显。

辉绿岩(图 4-c):岩石新鲜,灰绿色,辉绿结构,块状构造。主要由斜长石(50%~55%)、辉石(20%~30%)、角闪石(5%~10%)及副矿物磁铁矿等组成。斜长石呈自形-半自形中粒板条状,较为新鲜,可见清楚的聚片双晶,据双晶法测定,由 An35-40 中长石组成。辉石主要为普通辉石,他形粒状,但大部分普通辉石都已经蚀变,发生绿泥石化与黑云母化,局部可见斜长石与辉石呈嵌晶结构。少量角闪石充填在普通辉石与斜长石之间。

安山玄武岩(图 4-d)的矿物成分与拉斑玄武岩大致相同。灰黑色,斑状结构,杏仁构造。主要由细长条状蚀变斜长石(30%~40%)、少量辉石、橄榄石微晶和较多的褐色火山玻璃构成玻晶交织结构。杏仁体以圆形为主,充填物为玉髓和沸石。

## 3 分析方法

岩石的测试分析在国家地质测试中心完成,其中主量元素用熔片 X-射线荧光光谱法(XRF)测定,并采用等离子光谱和化学法测定进行互相检测,微量元素中的 V、Cr、Co、Ni、Sr、Zr、Nb、Ta、Hf、Ba、Th、U 等元素用熔片 XRF 和酸溶等离子质谱(ICP-MS)法测定,稀土元素用 ICP-MS 法测定,其中的 Nb、Ta、Zr、Hf 是用碱溶法、沉淀酸提取、用等离子质谱法测定。火山岩的化学成分及微量和稀土元素分析结果见表 1。

本文对采自白杨沟地区玄武岩样品进行了 Rb-Sr、Sm-Nd 和 Pb 同位素测定。样品中的 Sm、Nd、Sr、U、Th 和 Pb 元素含量以及同位素比值测定均在南京大学现代分析中心 VG354 多接收质谱仪上完成。实验测定 NBSS987Sr 同位素标准;以  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$  为标准化值,测得  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710236\pm 7$ ;对 La Jolla Nd 同位素标准样中  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  的测定值为  $0.511864\pm 3$ ;标准化值采用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$  校正。为了去除岩石表面、裂缝和裂口污染物,需用 HF-HBr 混合液对其样品进行清洗;0.1g 的粉末样品用 HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 混合酸来溶解;U-Th-Pb 的化学分离是通过分析级的阳离子交换树脂和阴离子交换树脂来进行的;Pb 的同位素质谱分析是采用硅胶-磷酸发射技术和单铯带单接收技术;测定





图3 白杨沟火山岩野外照片

a、b—枕状熔岩(远景);c—典型枕状构造;d—枕体的冷凝边;  
e—脉状辉绿岩

Fig.3 Outcrops of Baiyanggou volcanic rocks in eastern Tianshan Mountains

a, b—Pillow lava (distant shot); c—Typical pillow structure; d—Condensing side of the pillow body; e—Diabase vein

NBS981Pb 同位素标准为  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.941 \pm 0.008$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.487 \pm 0.011$ , 和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.715 \pm 0.009$ , 测定值都用 NBS981 标样进行标准化校正, 详细的 Sm-Nd、Rb-Sr 和 U-Th-Pb 化学制备, 质谱测定方法以及各类标准样品测定结果可见有关报道<sup>[28,33]</sup>。

## 4 岩石的化学成分特征

本研究共完成了 16 件岩石样品的全岩分析, 包括主元素、微量元素和稀土元素。其中玄武岩 5 件、安山玄武岩 10 件、辉绿岩 1 件。从表 1 分析结果可以看出研究区岩石  $\text{H}_2\text{O}$  与  $\text{CO}_2$  含量在 1.33%~7.44%, 这可能与镜下观察到的岩石遭受一定蚀变作用一致, 文中岩石主量元素成分的作图和讨论采用的是去  $\text{H}_2\text{O}$  与  $\text{CO}_2$  标准化的结果。

### 4.1 主量元素

在 TAS 分类图中 (图 5), 16 件样品均落在玄武岩、安山玄武岩区域内, 并且大部分点都落在 Irvine 分界线以下的亚碱性区域, 靠近于分界线。由于样品已有一定程度的蚀变, 考虑到蚀变过程中 K、Na 等碱金属元素的活性较强, 进一步利用蚀变过程中不活泼元素 (Zr、Ti、Nb、Y) 进行判别, 在  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001 - \text{Nb}/\text{Y}$  图解 (图 6) 上, 所有样品点都落在亚碱性系列的玄武岩、安山岩区域内。两种方法所确定的岩石类型与镜下观察基本一致。对所有亚碱性系列的样品再次划分, 通过在 AFM 图解上的投点 (图 7), 样品都集中在钙碱性区域和钙碱性与拉斑系列的交界线上。几种岩石的成分特征分述如下:

玄武岩:  $\text{SiO}_2$  含量变化范围在 50.17%~51.84%, 均值 50.94%。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高, 变化于 14.51%~16.44%, 均值 15.30%。岩石中  $\text{MgO}$  含量为 5.15%~7.89%,  $\text{Mg}^\#$  值为 63.64~72.38, 均值 68.77。 $\text{P}_2\text{O}_5$  含量低, 为 0.15%~0.20%,  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  的含量分别为 2.76%~4.69%、0.07%~0.75%;  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  总量低, 为 2.84%~4.76%;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = (0.026 \sim 0.21)$ ,  $\text{Na}_2\text{O} - 2 > \text{K}_2\text{O}$ 。岩石属亚碱性系列,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量高与岩石经历较强的海底热液蚀变相一致。 $\text{TiO}_2$  含量稳定, 介于 1.34%~1.88%, 平均 1.55%, 可与典型的大洋玄武岩和弧后盆地玄武岩的平均值 (1.5%) 相比, 但与活动大陆边缘及岛弧区火山岩平均值 (0.84%) 相差较大<sup>[34]</sup>。

安山玄武岩:  $\text{SiO}_2$  含量变化范围在 52.21%~

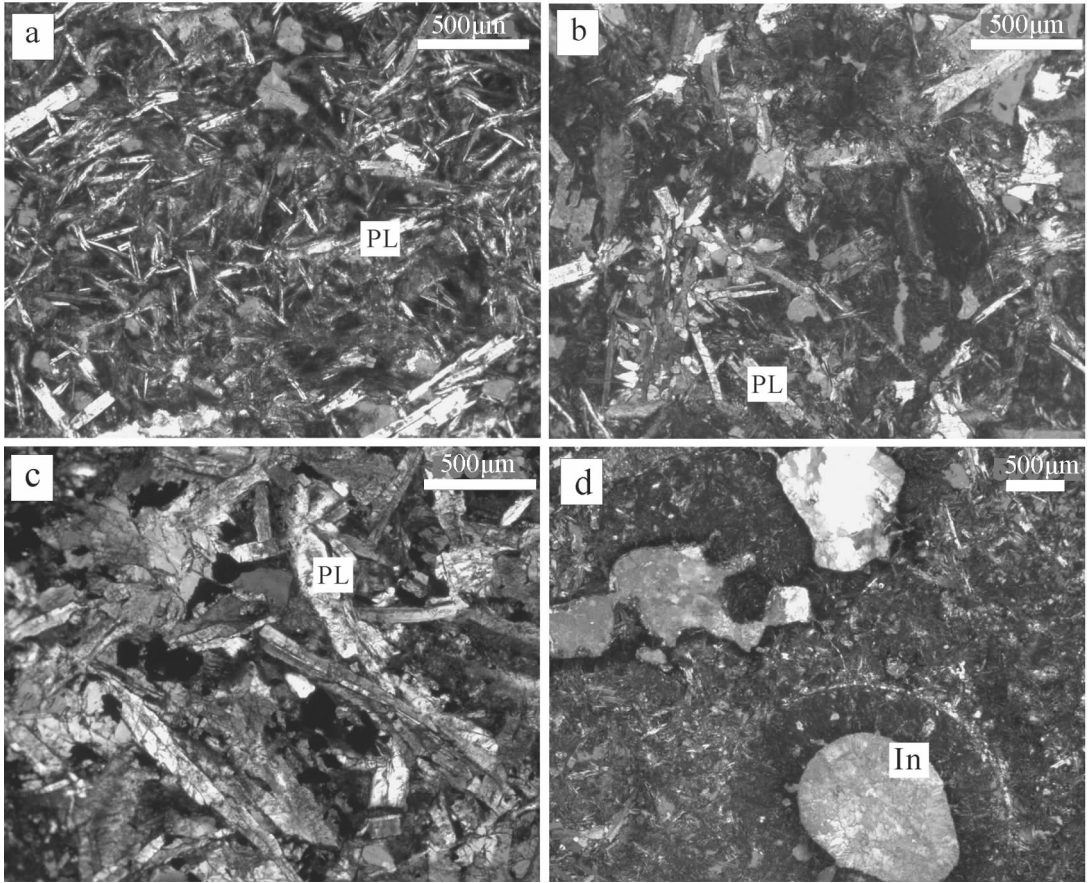


图 4 研究区显微镜下照片

a—拉斑玄武岩;b—橄榄玄武岩;c—辉绿岩;d—含杏仁体安山玄武岩;PL—斜长石、In—杏仁体

Fig.4 Petrographic characteristics of Baiyanggou volcanic rocks from eastern Tianshan Mountains

a- Tholeiite; b-Olivine basalt; c-Diabase; -Basaltic andesite with amygdale; PL-Plagioclase; In-Amygdale

54.66%, 均值 53.49%;  $Al_2O_3$  含量也较高, 变化于 13.10%~15.08%, 均值 14.04%; 岩石中 MgO 含量为 4.62%~7.62%,  $Mg^\#$  值为 50.27~72.76, 均值 62.74, 较上述玄武岩略低, 并有较多重叠区。  $P_2O_5$  含量低, 为 0.14%~0.29%;  $Na_2O$ 、 $K_2O$  含量分别为 3.61%~4.99%、0.19%~0.82%;  $Na_2O + K_2O$  在 4.22%~5.40%;  $K_2O/Na_2O = (0.038 \sim 0.21)$ ;  $Na_2O - 2 > K_2O$ ;  $TiO_2$  1.23%~2.79%, 均值 1.84%, 与上述玄武岩一致接近于典型的大洋玄武岩和弧后盆地玄武岩的平均值<sup>[34]</sup>。

辉绿岩:  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  含量为 50.83%、15.47%。 $Na_2O$  和  $K_2O$  的含量分别为 2.84% 和 0.34%。 $K_2O/Na_2O = 0.12$ 。 $MgO$ 、 $TFeO$ 、 $TiO_2$ 、 $P_2O_5$  分别为 8.19%、8.34%、1.11%、0.11%。

从成分上看, 安山玄武岩、玄武岩和辉绿岩的成分差别不大, 并有较多的重叠, 结合野外和显微镜下观察, 认为它们在成因上密切相关。

## 4.2 稀土元素和微量元素特征

博格达白杨沟玄武岩稀土元素总量变化于  $63.33 \times 10^{-6}$ ~ $75.61 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 为 2.18~2.30,  $(La/Yb)_N$  变化范围为 1.12~1.41, 比值均大于 1。经球粒陨石标准化的稀土配分曲线 (图 8) 呈现出 LREE 轻微富集的右倾曲线。玄武岩 Eu 无明显异常 ( $\delta Eu = 0.92 \sim 1.12$ ), 说明岩浆在演化过程中斜长石的分离结晶作用不明显; 安山玄武岩稀土总量变化较大 ( $55.86 \times 10^{-6}$ ~ $106.66 \times 10^{-6}$ ), LREE/HREE 比值为 1.90~2.64,  $(La/Yb)_N$  变化范围为 1.01~1.97。安山玄武岩  $\delta Eu$  相对较低 (0.89~1.02), 说明斜长石的分离结晶不明显。总体来说, 玄武岩与安山玄武岩稀土元素的变化趋势相同, 都呈相似的轻稀土略微富集型的分布模式, 显示出同源连续演化的特征,  $\delta Eu$  平均值为 0.94, 微弱负异常, 表示岩浆结晶分离过程中并无明显斜长石的参与。

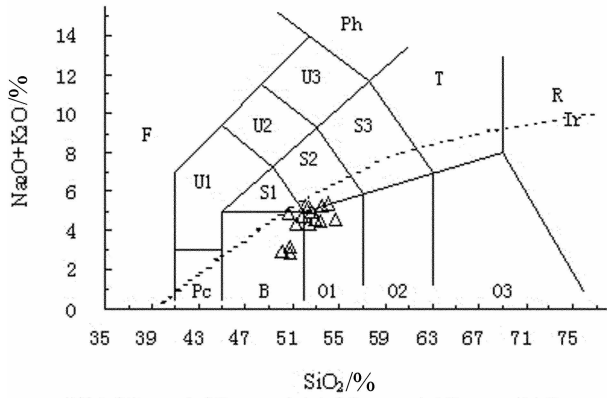




续表 1

样品号	玄武岩										安山玄武岩										07Y-513 辉绿岩
	07Y-506	07Y-508	07Y-509	07Y-524	07Y-525	07Y-500	07Y-502	07Y-504	07Y-519	07Y-520	07Y-528	07Y-530	07Y-531	07Y-532	07Y-533						
Pb	2.92	3.22	3.15	2.11	2.45	2.14	-	-	4.5	-	3.05	-	3.77	2.43	-						
Nb	2.25	2.41	2.62	1.77	1.94	2.27	1.62	1.99	2.21	2.27	3.97	2.69	3.17	3.31	3.21						
Ta	0.38	0.19	0.19	0.13	0.15	0.28	0.17	0.18	0.16	0.21	0.41	0.25	0.3	0.31	0.25						
Hf	3.26	3.44	3.82	2.65	2.92	3.2	2.68	2.98	3.09	3.62	5.54	4.63	4.43	4.81	4.86						
La	6.89	6.75	7.27	5.19	5.25	7.09	9.31	5.25	6.75	10.8	10.3	10.6	9.69	10.1	11.4						
Ce	18.3	18.9	20	15	16.5	18.1	21	15.2	17.8	25.3	28.5	27.8	25.8	27.4	31.7						
Pr	2.73	2.82	2.97	2.28	2.58	2.71	2.87	2.33	2.55	3.62	4.36	4.31	3.83	4.05	4.66						
Nd	13.6	14.5	15.5	11.7	13.6	13.3	13.9	12.8	13	19.1	22.6	22.8	18.8	19.8	23						
Sm	3.98	4.42	4.73	3.49	4.11	4.03	3.93	4.44	3.81	5.7	6.66	6.96	5.59	6.04	6.83						
Eu	1.67	1.56	1.74	1.29	1.38	1.41	1.33	1.47	1.24	1.84	2.27	2.16	2.05	2.26	2.25						
Gd	5.25	5.35	5.89	4.24	5.1	5.29	4.89	5.39	4.68	6.31	8.03	7.81	7.22	7.75	8.43						
Tb	0.85	0.89	0.97	0.72	0.83	0.86	0.87	0.93	0.78	1.05	1.33	1.38	1.15	1.25	1.45						
Dy	5.57	5.88	6.46	4.61	5.44	5.74	5.68	5.96	5	7.15	8.91	9.18	7.49	8.25	9.01						
Ho	1.21	1.2	1.35	1	1.14	1.23	1.12	1.32	1.06	1.48	1.93	1.92	1.62	1.7	1.77						
Er	3.38	3.62	3.98	2.86	3.32	3.49	3.13	3.62	3.1	4.22	5.43	5.35	4.77	5.05	5.14						
Tm	0.49	0.49	0.54	0.4	0.45	0.51	0.44	0.54	0.44	0.6	0.76	0.73	0.64	0.73	0.79						
Yb	3.31	3.42	3.66	2.7	3.18	3.28	3.2	3.53	2.9	3.9	5.17	4.89	4.34	4.79	5.44						
Lu	0.49	0.49	0.55	0.38	0.45	0.5	0.5	0.53	0.44	0.6	0.75	0.77	0.63	0.7	0.82						
Y	26.6	34.7	37.7	27.9	32.5	26	29.6	35.8	30.1	40.5	41.1	49.4	35.7	37.9	49.7						
(La/Yb) <sub>N</sub>	1.41	1.33	1.34	1.3	1.12	1.46	1.97	1.01	1.57	1.87	1.35	1.46	1.51	1.42	1.2						
(Nb/La) <sub>N</sub>	0.35	0.38	0.39	0.4	0.37	0.34	0.19	0.41	0.23	0.35	0.41	0.27	0.35	0.35	0.3						
LREE/HREE	2.29	2.29	2.23	2.3	2.18	2.23	2.64	1.9	2.45	2.62	2.31	2.33	2.36	2.3	2.43						
δ Eu	1.12	0.98	1	1.02	0.92	0.93	0.93	0.92	0.89	0.93	0.94	0.89	0.99	1	0.91						





Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; O1—安山玄武岩; O2—安山岩; O3—英安岩;  
R—流纹岩; S1—粗面玄武岩; S2—玄武质粗面安山岩; S3—粗面安山岩; T—粗面岩、  
粗面英安岩; F—副长石岩; U1—碱玄岩、碧玄岩; U2—响岩质碱玄岩;  
U3—碱玄质响岩; Ph—响岩; Ir—Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性

图5 白杨沟火山岩 TAS 分类图

Fig.5 TAS plots of bimodal volcanic rocks from Baiyanggou

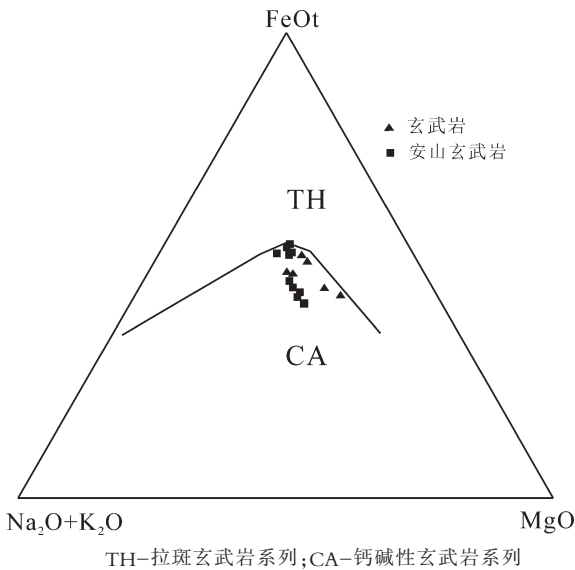


图7 白杨沟地区火山岩 AFM 图解<sup>[36]</sup>

Fig.7 AFM diagram for basalts from Baiyanggou volcanic rocks

白杨沟火山岩微量元素分析结果(表 1)表明,玄武岩和安山岩所有样品的 Ni 和 Cr 含量均低于判别原始岩浆的参考数值 250 μg/g 和 300 μg/g<sup>[37]</sup>,表明它们是原始岩浆演化后的产物。微量元素的 N-MORB 标准化蛛网图(图 9)显示,玄武岩与安山玄武岩相似,总体均属强不相容元素富集型,并具有 Nb 和 Ti 的轻度亏损,这与许多地区大陆拉斑玄武岩具有 Nb、Ti 负异常的特征一致<sup>[39-41]</sup>。其中 Sr 强烈亏损,从 Nb 向右各样品的标准化模式相似,但高度

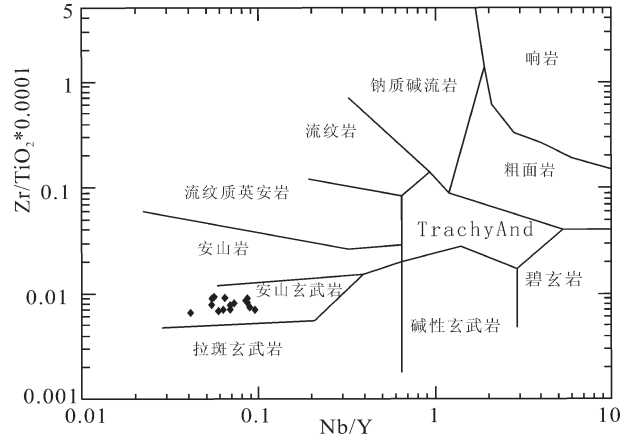


图6 白杨沟地区火山岩  $Zr/TiO_2 * 0.0001-Nb/Y$  图解<sup>[35]</sup>  
Fig.6 Classification of Baiyanggou volcanic rock types based on  $Zr/TiO_2 * 0.0001$  versus  $Nb/Y$

不相容元素(Rb、Ba、K 及 Th)的丰度明显分散。而且明显可以分为一组相对富集,另一组相对亏损的特征,表明其形成的过程中有不同组分的参与。

### 5 Sr、Nd、Pb 同位素特征

在讨论地幔地球化学和深部作用过程时, Sr、Nd、Pb 等同位素在时间示踪和源区示踪方面有突出的优点,但放射成因子体同位素的积累程度与岩石的年龄有关<sup>[42]</sup>。因此首先对已测出的 Sr、Nd、Pb 同位素值进行初始值的计算,计算的时间采用岩体中辉绿岩的年龄 289 Ma<sup>[13]</sup>。白杨沟熔岩的 Sr、Nd、Pb 测试值及初始值见表 2。其中  $\epsilon_{Sr}(t)$  为 -14.0~-17.5,  $^{87}Sr/^{86}Sr_0$  比值 0.70293~0.70317, 变化较小。 $\epsilon_{Nd}(t)$  为 +2.8~+3.1,  $^{143}Nd/^{144}Nd_0$  为 0.512407~0.512422。 $^{206}Pb/^{204}Pb_0$  变化范围为 17.622~17.835,  $^{207}Pb/^{204}Pb_0$  为 15.374~15.463,  $^{208}Pb/^{204}Pb_0$  为 38.163~38.339。可知白杨沟玄武岩和安山岩 Sr、Nd、Pb 同位素值基本相似。

### 6 讨论

#### 6.1 构造环境

上述分析表明白杨沟玄武岩与安山玄武岩属于同源岩浆的产物。某些微量元素的丰度和比值有时能够有效地指示样品的形成环境。例如白杨沟枕状熔岩的 Ti/Zr、Ti/Y 和 Zr/Y 比值平均值分别为 80、290 和 3.69, 接近于 E-MORB 的比值(分别为 83、272 和 3.32)<sup>[38]</sup>。一般情况下,岛弧玄武岩和部分亏损型洋中脊玄武岩(N-MORB)的 Nb、Ta 丰度不大

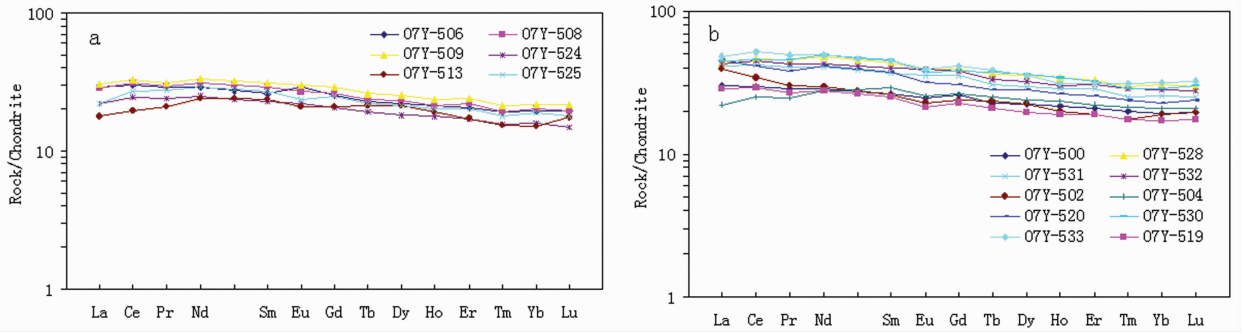


图 8 白杨沟火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解

a-玄武岩;b-安山岩

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of Baiyanggou volcanic rocks from northern Tianshan Mountains

a-Basalt;b-Andesite

于  $12 \times 10^{-6}$ 、 $0.7 \times 10^{-6}$ 、 $Nb/La < 1$ 、 $Hf/Ta > 5$ 、 $La/Ta > 15$ 、 $Ti/Y < 350$ ，而板内玄武岩(WPB)、过渡型洋中脊玄武岩(T-MORB)和富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)则正好相反<sup>[43]</sup>。研究区白杨沟枕状熔岩的 Nb 丰度为  $1.12 \times 10^{-6} \sim 3.97 \times 10^{-6}$ ，Ta 丰度为  $0.13 \times 10^{-6} \sim 0.41 \times 10^{-6}$ ，均较低，Nb/La 比值为 0.17~0.38，Hf/Ta 为 8.57~20.38，La/Ta 为 29~54，Ti/Y 为 318~329，表明研究区玄武岩类似于岛弧环境或 MORB 的环境。

此外， $Hf/3-Th-Nb/16$  判别图解被广泛用于玄武岩的形成环境判别<sup>[44]</sup>，尤其是识别火山弧玄武岩，火山弧玄武岩与消减作用关系密切，下插的板片携带溶于含水流体相的大离子亲石元素 K、Rb 等活性元素进入火山弧玄武岩的地幔楔形源区，同时亏损非活动性 Nb、Ta 等元素。并且火山弧玄武岩依据 Hf/Th 是否大于 3，进一步分为岛弧拉斑玄武岩 ( $Hf/Th > 3$ )，以及钙-碱性玄武岩 ( $Hf/Th < 3$ )<sup>[44]</sup>。白杨沟所有样品值全部落在岛弧拉斑玄武岩区域中

(图 13);而微量元素蛛网图(图 9)显示 K、Rb、Ba 明显分为两组，一组为 K、Rb、Ba 富集，而另一组为相对亏损，后者符合 MORB 型玄武岩的特征。在构造环境判别图  $Zr/Y-Zr$  中 (图 14)，样品点都集中于 MORB 与 WPB 区域。在研究西南太平洋盆地和 Sunda 岛弧后发现，弧后盆地张开的早期阶段，玄武岩的成分和来源非常复杂，可能是两种或两种以上的不同地幔端员混合的产物。有些玄武岩富集大离子亲石元素，并伴有 Ta、Nb 的负异常，显示来自弧后盆地消减的岩石圈。随着扩张发展到弧后盆地的成熟阶段，消减作用减弱，玄武岩具有 MORB 的特征。博格达山南麓火山岩就同时存在着 IAT 与 MORB 的特征，表明它们有可能形成于弧后盆地环境，同样在吐-哈盆地的南侧觉罗塔格玄武岩也呈现相似的特征<sup>[46]</sup>。在博格达东段刺海沟、七角井、大石头-色皮口火山岩的出露较多双峰式火山岩，酸性火山岩通常是陆壳重熔的产物<sup>[47]</sup>，而刺海沟、七角

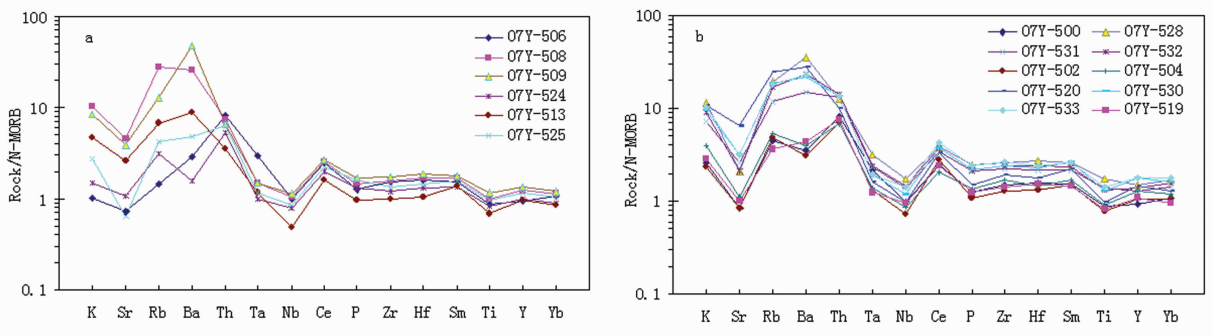


图 9 白杨沟火山岩微量元素 N-MORB 标准化蛛网图<sup>[38]</sup>

a-玄武岩;b-安山岩

Fig.9 N-MORB normalized trace elements patterns of Baiyanggou volcanic rocks from northern Tianshan Mountains

a-Basalt;b-Andesite

表 2 白杨沟玄武岩、安山玄武岩 Nd、Sr 和 Pb 同位素组成  
Table 2 Sr-Nd-Pb isotope compositions of basalts and andesite from Baiyanggou

样品	07Y-502	07Y-504	07Y-509	07Y-513	07Y-520	07Y-524
Rb( $\mu$ g/g)	2.693	2.975	6.987	7.073	14.06	1.684
Sr( $\mu$ g/g)	73.89	98.93	349.2	353.4	576.1	98.39
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}_{(M)}$	0.1069	0.0873	0.0614	0.0881	0.0724	0.0525
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(M)}$	0.70337	0.70334	0.70336	0.70338	0.70332	0.70339
1s	9	6	8	7	9	7
$\varepsilon_{\text{Sr}(t)}$	-17.5	-16.7	-15.0	-16.3	-16.1	-14.0
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t)}$	0.70293	0.70298	0.70310	0.70301	0.70303	0.70317
Sm( $\mu$ g/g)	4.012	4.328	4.826	5.031	5.607	3.906
Nd( $\mu$ g/g)	14.02	13.94	15.71	16.34	18.86	13.57
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1731	0.1839	0.1841	0.1879	0.1813	0.1774
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(M)}$	0.512751	0.512756	0.512761	0.512765	0.512757	0.512753
1 $\sigma$	6	9	8	5	7	7
$\varepsilon_{\text{Nd}(t)}$	3.1	2.8	2.9	2.8	2.9	3.0
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(t)}$	0.512422	0.512407	0.512412	0.512408	0.512413	0.512416
U( $\mu$ g/g)	0.5172	0.5646	0.2985	0.3164	0.5239	0.4987
Th( $\mu$ g/g)	0.7981	0.7792	0.7891	0.8109	0.9632	0.8936
Pb( $\mu$ g/g)	5.034	4.975	3.2091	5.372	4.703	4.608
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(M)}$	17.982	18.006	18.013	18.031	17.992	18.024
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(M)}$	15.418	15.483	15.425	15.396	15.398	15.393
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(M)}$	38.506	38.498	38.518	38.452	38.384	38.367
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(t)}$	17.640	17.628	17.703	17.835	17.622	17.664
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(t)}$	15.400	15.463	15.409	15.386	15.379	15.374
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(t)}$	38.339	38.333	38.259	38.293	38.169	38.163

注:计算所需的参数如下: $\lambda(\text{Sr})=1.39\times 10^{-11}$ 年 $^{-1}$ , $\lambda(\text{Nd})=6.54\times 10^{-12}$ 年 $^{-1}$ , $\lambda(^{238}\text{U})=1.55125\times 10^{-10}$ 年 $^{-1}$ , $\lambda(^{235}\text{U})=9.8485\times 10^{-10}$ 年 $^{-1}$ , $\lambda(^{232}\text{Th})=4.9475\times 10^{-11}$ 年 $^{-1}$ , $t=289$  Ma。

井火山岩可能是在伸展扩张作用的初期,在大陆裂谷环境下地壳物质的重熔与地幔物质的混合而形成。白杨沟地区出露的少量流纹质晶屑凝灰岩,局限地分布于枕状熔岩与硅质、泥沙质岩之间,呈断层接触<sup>[13]</sup>。与本区出露的大面积巨厚层枕状熔岩相比,少量薄层状流纹质晶屑凝灰岩与巨厚层枕状熔岩构成双峰式火山岩的可能性不大。因此,笔者认为博格达白杨沟火山岩与相邻区类似火山岩同样都是在古亚洲洋关闭过程中拉张环境下裂解而成的,博格达造山带东西两段火山岩的构造环境相同,只不过博格达东段为伸展早期阶段,多具裂谷性质,而博格达西

段为伸展作用晚期成熟阶段,更多具弧后盆地特征。

## 6.2 源区特征

博格达白杨沟火山岩微量元素中 HFSE 相对 LREE 亏损( $(\text{Nb}/\text{La})_N=0.19\sim 0.41$ ),另有  $\text{La}/\text{Sm}=1.15\sim 2.37$ ,通常认为高  $\text{La}/\text{Sm}(>4.5)$  值指示了地壳物质的混染<sup>[48]</sup>,表明本区岩浆经历陆壳混染可能性较小,而可能是由于早期俯冲物质在深部发生脱水并交代了地幔楔,导致该地幔源区相对富集 LILE 而亏损 HFSE,由此源区岩浆产生的火山岩同样继承了这一特点。从表 2 中数据表明白杨沟熔岩来自 Sr 同位素较均匀的同源区,现在大洋玄武岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t)}$  比

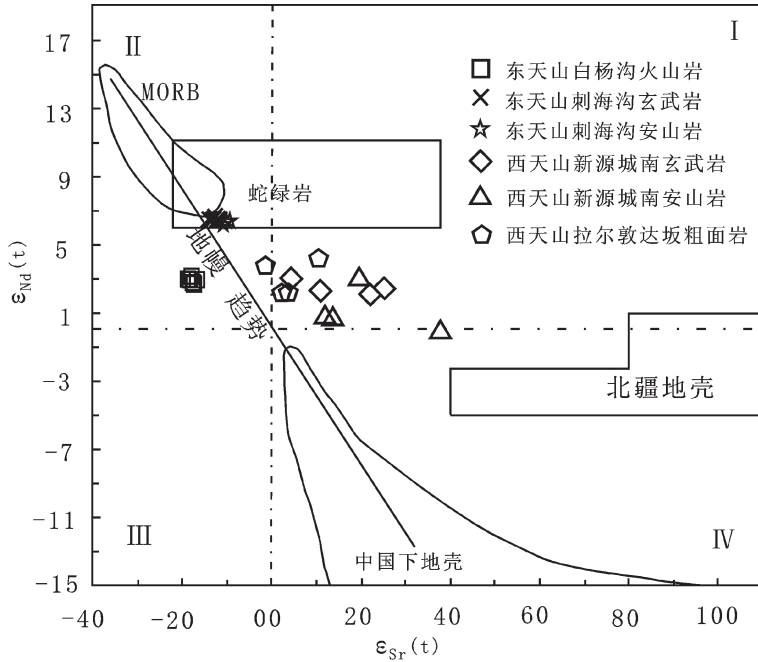


图 10 天山石炭纪—早二叠世火山岩  $\epsilon_{Nd}(t)$  vs  $\epsilon_{Sr}(t)$  图解<sup>[50]</sup>

Fig.10  $\epsilon_{Nd}(t)$  versus  $\epsilon_{Sr}(t)$  diagram for basalts of Carboniferous - Early Permian volcanic rocks in Tianshan

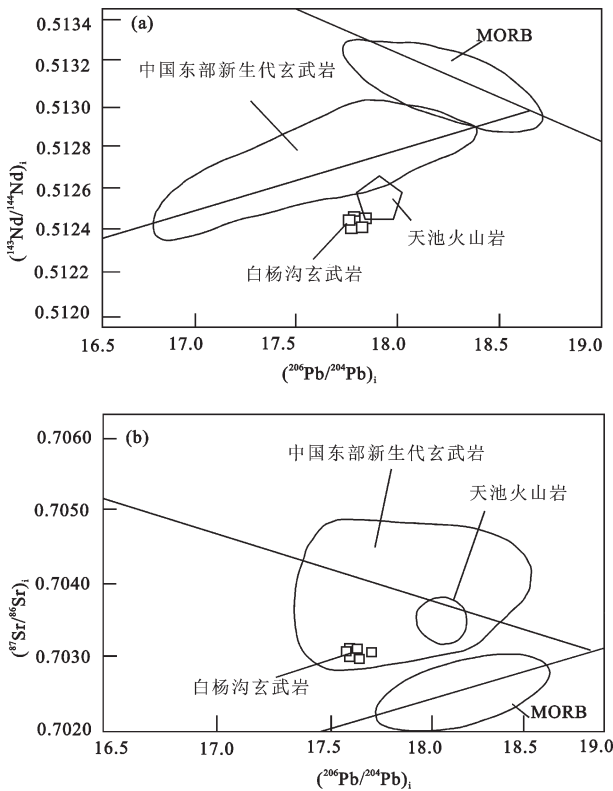
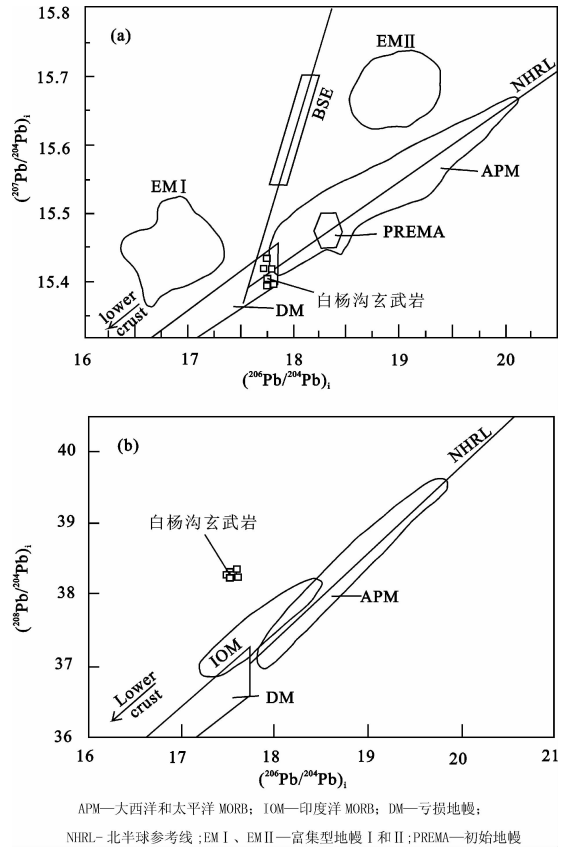


图 11 Pb 白杨沟火山岩同位素的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  vs  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  比值变化图<sup>[11,51]</sup>  
Fig.11  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  versus  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  diagram for Baiyanggou basalts



APM—大西洋和太平洋 MORB; IOM—印度洋 MORB; DM—亏损地幔; NHRL—北半球参考线; EM I、EM II—富集型地幔 I 和 II; PREMA—初始地幔

图 12 Pb 白杨沟火山岩同位素的  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ ,  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  vs  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  比值变化图<sup>[47,52]</sup>  
Fig.12  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ ,  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  versus  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  diagram for Baiyanggou basalts



值为 0.702~0.707<sup>[49]</sup>,通常被认为是未遭受地壳硅铝物质混染的岩石,代表岩浆来自于上地幔源区,白杨沟熔岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_0$  均值为 0.70304,指示本区岩浆源区来自于上地幔,且未受地壳物质的混染。

在地幔演化过程中,Sr 是强不相容元素,Nd 是中等不相容元素,Sr 与 Nd 会进入熔体,因此部分熔融程度越高,则残余地幔中 Sr 和 Nd 越为亏损。白杨沟熔岩  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  的负值、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  正值和低 Pb 同位素初始值均表明白杨沟熔岩的岩浆源区为亏损地幔源区,从  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  图 10 中可知,白杨沟火山岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  都在 MORB 之下,并且偏离地幔演化线,说明源区相比于初始地幔更为亏损。并用白杨沟熔岩与世界各地典型的玄武岩对比发现,在  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_0$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_0$  图 11-a、11-b 中,白杨沟玄武岩样品点落在天池玄武岩和中国东部新生代玄武岩区内,从而进一步证明白杨沟熔岩来自地幔岩浆。此外,在图 12-a 中  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  vs  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  显示岩浆同样主要来自 DM 端元组分。从图 12-b  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  vs  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  显示白杨沟熔岩的  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  值高于北半球参照线 (NHRL),Pb 同位素存在 DUPAL 异常<sup>[5]</sup>,这可能是由消减组分加入到地幔中所引起的,这种消减的组分或者是消减的地壳(如大洋沉积物和陆源碎屑物),或者是再循环的大陆下岩石圈<sup>[6]</sup>。但  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  极小的负值,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) > 0$  指示该岩石组合很有可能来源于强烈亏损的地幔源区。

白杨沟熔岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征与博格达造山带东段火山岩相似,例如大石头—色皮口流纹岩的同位素特征:  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 +5.3~+6.4、 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  为 -9.1~-12.0、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_0$  为 0.703289~0.703496、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_0$  为 18.037~18.425、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_0$  为 15.524~15.567、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_0$  为 37.198~37.810;刺海沟、七角井地区所发现的双峰式火山岩也具有相类似的同位素特征值:  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 +6.3~+6.7、 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  为 -14.0~-17.5、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_0$  为 0.703261~0.703328、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_0$  为 17.703~17.989、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_0$  为 15.407~15.498、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_0$  为 37.147~37.825<sup>[29,33]</sup>,表明它们均来自亏损地幔源区。对于西天山石炭纪火山岩(图 10),朱永峰等<sup>[55,59]</sup>做了详细报道,采集了西天山不同地区的石炭纪火山岩,其中包括玄武岩、安山岩及粗面岩,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  分别为 +0.89~+3.04、-0.22~+0.87、+2.68~+4.29,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_0$  分别为 0.7045~0.7058、0.7045~0.7068、0.7015~0.7051。由此表明,西天山不同地区的火山岩同位素值不同,与东天山博格达造山带的石炭纪火山岩更具明显差别,反映它们不是同一性质岩浆演化的产物,源区物质来源具有多样性的特征,而博格达造山带东西两段火山岩源区相近。

### 7 结论

(1)东天山博格达西段白杨沟火山岩的岩石类型、岩石化学和稀土元素、微量元素地球化学研究表

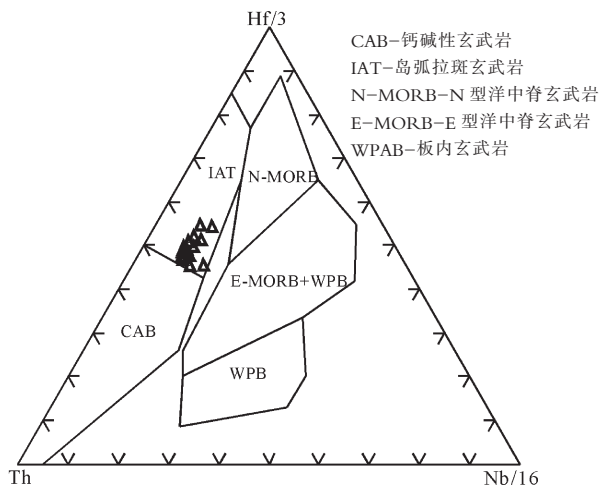


图 13 白杨沟玄武岩火山岩 Hf/3-Th-Nb/16 构造环境判别图解<sup>[44]</sup>

Fig.13 Hf/3Th-Nb/16 tectonic setting discrimination diagram of Baiyanggou basalts from eastern Tianshan Mountains

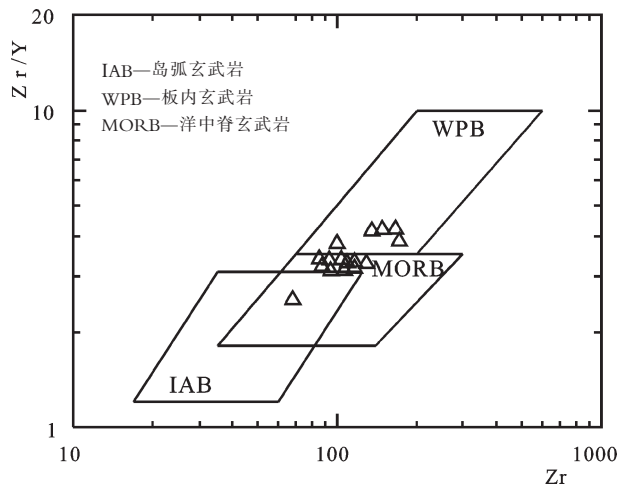


图 14 白杨沟玄武岩火山岩 Zr/Y-Zr 构造环境判别图解<sup>[45]</sup>

Fig.14 Zr/Y-Zr tectonic setting discrimination diagram of Baiyanggou basalts from eastern Tianshan Mountains

明本区玄武岩具有 MORB 和 IAT 的特征,认为本区火山岩可能形成于弧后盆地构造环境。对比东天山相邻区域石炭纪—早二叠世火山岩后发现,博格达南麓、觉罗塔格火山岩同样形成于弧后盆地环境,都是古亚洲洋关闭过程中主动大陆边缘拉张裂解的结果。

(2)东天山博格达西段白杨沟火山岩与博格达东段火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素研究表明,都具正低  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、负  $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$  和低 Pb 同位素比值的特征,一致反映均来源于亏损地幔源区。而西天山与东天山石炭纪—早二叠世火山岩在不同地区不同岩性的差别显著,反映它们源区的多样性。

**致谢:**国家地质测试中心在地球化学测试及南京大学同位素实验室在同位素测试—数据处理等方面提供的帮助,杨天南研究员和朱永峰教授两位审稿人对本文提出很好的修改意见,一并致以诚挚的谢意。

#### 参考文献 (References):

- [1] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及邻区大地构造 [J]. 新疆地质科学, 1992:1-167.  
Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, et al. On the Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang, Northwest China [M]. Geoscience of Xinjiang, 1992:1-167 (in Chinese with English abstract).
- [2] 陈富文, 李华芹, 陈毓川, 等. 东天山土屋—延东斑岩铜矿田成矿时代精确测定及其地质意义[J]. 地质学报, 2005, 79(2):256-261.  
Chen Fuwen, Li Huaqin, Chen Yuchuan, et al. Zircon SHRMP U-Pb dating and its geological significance of mineralization in Tuwu-Yandong porphyry copper mine, East Tianshan Mountains [J]. Acta Geological Sinica, 2005, 79 (2):256-261 (in Chinese with English abstract).
- [3] 白云来, 陈启林, 汤中立, 等. 塔里木板块东北边缘弧后裂谷系统基性、超基性岩特征[J]. 中国地质, 2004, 31(3):254-261.  
Bai Yunlai, Chen Qilin, Tang Zhongli, et al. The Characteristics of basic-ultrabasic rocks in the back-arc rift system on the northeastern margin of the Tarim plate [J]. Geology in China, 2004, 31(3):254-261(in Chinese with English abstract).
- [4] 李锦铁, 肖序常. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述[J]. 地质学报, 1999, 34(4):405-419.  
Li Jinyi, Xiao Xuchang. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang crust, NW China [J]. Scientia Geologica Sinica, 1999, 34 (4):405-419 (in Chinese with English abstract).
- [5] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 2004, 23(9-10):903-910.  
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume [J]. Geol. Bull. Chin., 2004, 23(9-10):903-910(in Chinese with English abstract).
- [6] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷火山岩岩石成因[J]. 西北地质, 2008, 41(4):1-68.  
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. Petrogenesis of Carboniferous-Early Permian rift-related volcanic rocks in the Tianshan and its neighboring areas, northwestern China [J]. Northwestern Geology, 2008, 41(4):1-68(in Chinese with English abstract).
- [7] 吴庆福. 准噶尔盆地构造演化及含油气远景新绍地质 [J]. 新疆地质, 1986, 4(3):1-19.  
Wu Qingfu. Structural evolution and prospects of Junggar Basin [J]. Xinjiang Geology, 1986, 4 (3):1-19 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王利利, 张凯, 高明远. 准噶尔盆地南缘的构造演化特征及含油气预测[J]. 新疆石油地质, 1986, 7(2):1-9.  
Wang Lili, Zhang Kai, Gao Mingyuan. The southern margin of Junggar basin tectonic evolution and hydrocarbon prediction [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1986, 7 (2):1-9 (in Chinese with English abstract).
- [9] 杨浩, 顾连兴. 东天山造山带中吐哈地块的认识及意义 [J]. 南京大学学报(地球科学版), 1989, 25(1/2):82-86.  
Yang Hao, Gu Lianxing. Preliminary discussion on the tectonic significance of the Tulufan-Hami precambrian block in the East Tianshan orogenic belt [J]. Journal of Nanjing University (Earth Science Edition), 1989, 25 (1/2):82-86 (in Chinese with English abstract).
- [10] 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿 [M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社, 1994:1-437.  
He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, et al. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China [M]. Urumqi and Hongkong: Xinjiang People's Publication House and Educational and Cultural Press LTD, 1994:1-437(in Chinese with English abstract).
- [11] 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境[J]. 岩石学报, 2000, 16(3):305-316.  
Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, et al. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000a, 16(3):305-316(in Chinese with English abstract).
- [12] 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 博格达陆内碰撞造山挤压—拉张构造转折期的侵入活动[J]. 岩石学报, 2001, 17(2):187-198.  
Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, et al. Intrusive activities during compression-extension tectonic conversion in the Bogda intracontinental orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2):187-198(in Chinese with English abstract).
- [13] 舒良树, 朱文斌, 王博, 等. 新疆博格达南缘后碰撞期陆内裂谷

- 和地下水滑塌构造[J]. 岩石学报, 2005, 21(1):25-36.
- Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, et al. The post-collision intracontinental rifting and olistostrome on the southern slope of Bogda Mountains, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1):25-36(in Chinese with English abstract).
- [14] 刘德权. 新疆板块构造与矿产分布[J]. 西北地质, 1983, 4(2):1-12.
- Liu Dequan. Plate tectonics and the distribution of mineral resources in Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 1983, 4(2):1-12 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张良臣, 吴乃元. 天山地质构造及演化史 [J]. 新疆地质, 1985, 3(3):1-14.
- Zhang Liangchen, Wu Naiyuan. The Geotectonic and its evolution of Tianshan [J]. Xinjiang Geology, 1985, 3(3):1-14 (in Chinese with English abstract).
- [16] 成守德, 王广瑞, 杨树德, 等. 新疆古板块构造 [J]. 新疆地质, 1986, 4(2):1-26.
- Cheng Shoude, Wang Guangrui, Yang Shude, et al. The Palaeoplate tectonics of Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 1986, 4(2):1-26(in Chinese with English abstract).
- [17] 方国庆. 博格达山晚古生代坳拉谷(Aulacogen)的初步研究[J]. 新疆地质, 1990, 8(2):133-141.
- Fang Guoqing. Initial studies about Bogda MT. late palaeozoic aulacogen [J]. Xinjiang Geology, 1990, 8(2):133-141 (in Chinese with English abstract).
- [18] 方国庆. 新疆东部大地构造特点及演化 [J]. 西北地质, 1991, 12(3):6-11.
- Fang Guoqing. Tectonic features in eastern Xinjiang, and evolution [J]. Northwestern Geology, 1990, 12(3):6-11 (in Chinese with English abstract).
- [19] 马瑞士, 王赐银, 叶尚夫. 东天山构造格架及地壳演化 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1993:1-255.
- Ma Ruishi, Wang Ciyin, Ye Shangfu. Tectonic Framework and Crustal Evolution of Eastern Tianshan Mountains [M]. Nanjing: Publishing House of Nanjing University, 1993:1-255 (in Chinese with English abstract).
- [20] 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 东天山构造演化与成矿 [M]. 北京: 地质出版社, 1997:1-202.
- Ma Ruishi, Shu Liangshu, Sun Jiaqi. Tectonic Evolution and Metallogeny of Eastern Tianshan Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997:1-202(in Chinese with English abstract).
- [21] Gao J, Li MS, Xiao XC, et al. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China [J]. Tectonophysics, 1998, 287:213-231.
- [22] 韩宝福, 何国琦, 王式洸. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质[J]. 中国科学辑(D辑), 1999, 29(1):16-21.
- Han Baofu, He Guoqi, Wang Shiguang. Post-collisional mantle-derived magmatism, underplating and implication for basement of the Junggar basin[J]. Science in China(Series D), 1999, 29(1):16-21(in Chinese).
- [23] Coleman RG. Continental growth of northwest China [J]. Tectonics, 1989, 8:621-635.
- [24] 方国庆. 东天山古生代板块构造特点及其演化 [J]. 甘肃地质学报, 1994, 3(1):34-40.
- Fang Guoqing. Paleozoic plate tectonics of eastern Tianshan Mountains Xinjiang, China [J]. Acta Geologica Gansu, 1994, 3(1):34-40(in Chinese with English abstract).
- [25] 张传恒, 刘典波, 张传林, 等. 新疆博格达地区早二叠世软沉积物变形构造: 弧后碰撞前陆盆地地震记录 [J]. 地学前缘, 2006, 13(4):255-266.
- Zhang Chuanheng, Liu Dianbo, Zhang Chuanlin, et al. Early Permian seismically induced soft sediment deformational structures in Bogda region, Xinjiang: stratigraphic records of earthquakes in the retroarc collisional foreland basin [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(4):255-266(in Chinese with English abstract).
- [26] 郭威, 周鼎武, 欧阳征建, 等. 博格达山南缘达坂城东沟乡二叠纪岩浆岩及其形成地质环境 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(1):103-108.
- Guo Wei, Zhou Ding Wu, Ouyang Zhengjian, et al. Formation and its geological environment of the Permian magmatic rocks in Donggou county, Daban City, southern margin of Bogeda orogenic belt [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2009, 37(1):103-108(in Chinese with English abstract).
- [27] Shu LS, Wang B, Yang F, et al. Polyphase Tectonic Events and Meozoic-Cenozoic Basin-Range Coupling in the Chinese Tianshan belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(4):457-467.
- [28] 周济元, 茅燕石, 黄志勋, 等. 东天山古大陆边缘火山地质[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1994:1-280
- Zhou Jiyuan, Mao Yanshi, Huang Zhixun, et al. Volcanic Geology of Palaeocontinental Margin in East Tianshan Mountains [M]. Chendu: Chendu University of Science and Technology Press, 1994:1-280(in Chinese with English abstract).
- [29] 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 等. 博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学特征[J]. 岩石学报. 2006, 22(5):1215-1224.
- Wang Yinxi, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, et al. Geochronology and Nd-Sr-Pb isotopes of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(5):1215-1224(in Chinese with English abstract).
- [30] 胡霁琴, 张国新, 张前锋, 等. 天山造山带基底时代和地壳增生的 Nd 同位素制约[J]. 中国科学辑(D辑), 1999, 20(2):104-112.
- Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Zhang Qianfeng, et al. Tianshan orogenic crustal growth in the basement of the times and Nd isotopic constraints [J]. Science in China (Series D), 1999, 20(2):104-112(in Chinese with English abstract).

- [31] 王觉富, 舒良树. 东天山地区韧剪带石英超微组构分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1997, 33(3):464-470.  
Wang Juefu, Shu Liangshu. A study of ultramicro structure of quartz in the ductile shear zones in the Tianshan belt, Xinjiang[J]. Journal of Nanjing University: Nat. Sci. Ed., 1997, 33(3):464-470 (in Chinese with English abstract).
- [32] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1993:1-562.  
Geology and Mineral Resources Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993 :1-562(in Chinese with English abstract).
- [33] 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 等. 东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究 [J]. 岩石学报, 2007, 23(7): 1749-1755.  
Wang Yinxi, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, et al. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of rhyolite of the Late Carboniferous Dashitou group in eastern Tianshan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(7):1749-1755 (in Chinese with English abstract).
- [34] J. A. Pearce, S. J. Lippard, S. Roberts. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. Geological Society. London, Special Publications, 1984, 16:77-94.10.1144/GSL.SP.1984.016.01.06.
- [35] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20:325-343.
- [36] Irvine T N, Barager WRA. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8:523-548.
- [37] Wendlandt R F, Altherr R, Neumann E-R, et al. Petrology, geochemistry, isotopes [C]//Olsen K H (ed.). Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics Amsterdam:Elsevier, 1995:47-60.
- [38] Sun SS, McDonough WF. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders AD, Norry MJ (eds.). Magmatism in Ocean Basins. London: Geological Society Publication, 1989, 42:313-345.
- [39] Dupuy C, Dostal J. Trace element geochemistry of some continental tholeiites[J]. Earth Planet Sci.lett., 1984, 67:61-69.
- [40] Holm P E. The Geochemical fingerprints of different tectono-magmatic environments using hydromagmatophile element abundances of tholeiitic basalts and basaltic andesites Chem [J]. Geol., 1985, 51:303-323.
- [41] Jolly W T. Geology and geochemistry of Huronian rholites and low-Ti continental tholeiites from the Thessalon region, central Ontario[J]. Can J. Earth Sci., 1987, 24:1360-1385.
- [42] 周新华. 壳-幔深部过程化学动力学与大陆岩石圈研究[C]//郑永飞主编. 化学地球动力学. 北京:科学出版社, 1999:15-27.  
Zhou X H. The Chemical Geodynamics of Deeper Crust-mantle and the Continental Lithosphere[C]//Zheng Yongfei(ed.). Chemical Geodynamics. Beijing: Science Press, 1999:15-29 (in Chinese with English abstract).
- [43] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andsites across the Archaean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. Lithos, 1989, 23:1-18.
- [44] Wood D A. Avariably veined suboceanic uppermantle-genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence [J]. Geology, 1979, 7:499-503.
- [45] Pearce J A, Alabaster T, Shelton A W, et al. The Oman ophiolite as a Cretaceous arc-basin complex: Evidence and implications [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1981, A300:299-300.
- [46] 李源, 杨经绥, 张键, 等. 新疆东天山石炭纪火山岩及其构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(1):193-209.  
Li Yuan, Yang Jinsui, Zhang Jian, et al. Tectonical significance of the Carboniferous volcanic rocks in eastern Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1):193-209(in Chinese with English abstract).
- [47] Wilson M. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach[M]. London: the Academic Division of Unwin Hyman Ltd. 1989:267-320.
- [48] Lassiter J C, Depaolo D J. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotope constraints[J]. Geophysical monograph, 1997. 100:335-355.
- [49] White WM, Hofmann AW. Sr and Nd isotope geochemistry of oceanic basalts and mantle evolution [J]. Nature, 1982, 296(5860): 821-825.
- [50] Zhu Bingquan, Zhang Jinglian, Tu Xianlin, et al. Pb, Sr, and Nd isotopic features in organic matter from China and their implications for petroleum generation and migration[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(15):2555-2570.
- [51] Peng ZC, Zartman RE, Futa K ang Chen DG. Pb-Sr- and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China [J]. Chemical Geology (Isotope Geoscience Section), 1986, 59:3-33.
- [52] Zindler A, Hart S R. Chemical Geodynamics [M]. Annual review of earth and planetary sciences, 1986, 14:493-571.
- [53] Smith D A. The Geodynamic Significance of the DUPAL Anomaly in Asia [C]//Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al (eds.). Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia [J]. Washington DC: American Geophysical Union Monograph, 1998, 27:89-105.
- [54] Weis D, Frey F A, Saunders A, et al. Ninetyeast Ridge (Indian Ocean): A 5000Km record of a Dupal mantle plume [J]. Geology, 1991, 19:99-102.
- [55] 朱永峰, 周晶, 郭璇. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位



素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(5):1341-1350.  
Zhu Yongfeng, Zhou Jing, Guo Xuan. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(5):1341-1350(in Chinese with English abstract).

[56] Zhu YF, Xuan G, Song B, Zhang LF, et al. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. Journal of the Geological Society, London, 2009, 166:1085-1099.

## The pillow lava of Baiyanggou in Bogda, Xinjiang: geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics

XIONG Fa-hui<sup>1</sup>, YANG Jing-sui<sup>1</sup>, JIA Yi<sup>2</sup>, XU Xiang-zhen<sup>1</sup>,  
CHEN Song-yong<sup>1</sup>, LI Tian-fu<sup>1</sup>, REN Yu-feng<sup>1</sup>, ZUO Guo-chao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100830, China; 3. Gansu Geological Survey, Lanzhou 730000, Gansu, China)

**Abstract:** The late Carboniferous-Early Permian volcanic rocks in Baiyanggou of northeast Bogda orogenic belt mainly consist of sub-alkaline basalt and andesite, in which large quantities of pillow lavas are excellently preserved. Pillow lavas are mainly basic lavas, whose SiO<sub>2</sub> content is 46.65% to 52.50%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=13.10%~16.44%, MgO=4.62%~7.89%, TiO<sub>2</sub>=1.23%~2.79%, CaO=7.06%~13.07%, Na<sub>2</sub>O=2.76%~4.99%, and K<sub>2</sub>O=0.07%~0.89%. A group of basic lavas is enriched with large ion lithophile elements (LILE) such as Rb and Ba, and the other group is relatively depleted in LILE. In the N-MORB diagram, high field strength elements (HFSE) have significant negative anomalies of such elements as Nb and Ta. In the chondrite-normalized REE patterns, lavas show right-oblique curve with overall performance of flatness and slight enrichment of light rare earth elements (LREE);  $\delta \text{Eu}=0.89\sim 1.12$ . The composition of Sr-Nd-Pb isotopes shows that lavas have characteristics of the depleted mantle:  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=+2.8\sim +3.1$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(i)=0.512407\sim 0.512422$ ,  $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)=-14.0\sim -17.5$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)=0.70293\sim 0.70317$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i)=17.622\sim 17.835$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i)=15.374\sim 15.463$ , and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(i)=38.163\sim 38.339$ . In the tectonic setting diagram, Baiyanggou volcanic rocks have the characteristics of MORB and WPB. The comprehensive regional geological data and the results of previous studies have led the authors to conclude that Late Carboniferous-Early Permian volcanic rocks of the study area might have been derived from the depleted mantle during the closure of the back-arc basin in the active continental margin of Paleo-Asian Ocean.

**Key words:** pillow basalt; geochemistry; Sr-Nd-Pb isotope geochemistry; depleted mantle; arc basin, Baiyanggou

**About the first author:** XIONG Fa-hui, male, born in 1985, doctor, engages in the study of petrology; E-mail: xiongfahui@126.com.