

# 东天山石炭纪雅满苏组火山岩特征及地质意义

王 雯<sup>1</sup>, 夏 芳<sup>1</sup>, 柴凤梅<sup>1</sup>, 吴生军<sup>2</sup>, 李 强<sup>3</sup>, 耿新霞<sup>3</sup>, 孟庆鹏<sup>4</sup>

(1. 新疆大学 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆 乌鲁木齐 830049; 2. 新疆地质矿产勘查开发局第一地质大队, 新疆 昌吉 831100; 3. 中国地质科学院 矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 4. 新疆地质矿产勘查开发局矿产实验研究室, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘 要:** 雅满苏组火山岩是东天山石炭纪火山岩的重要组成部分,也是东天山地区海相火山岩型铁多金属矿床的赋矿地层。其年代学及地球化学研究对探讨该区古生代构造演化和火山岩型铁多金属矿床成因具有重要意义。本文对东天山地区雅满苏组火山岩的岩石学、地球化学和同位素年代学进行了系统研究。结果显示:雅满苏组是一套海相火山岩夹碳酸盐岩建造,其上亚组英安岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $334.4 \pm 1.7$  Ma (MSWD=0.67),代表了雅满苏上亚组火山岩形成时代,切穿雅满苏铁矿区矽卡岩及矿体的正长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $325.5 \pm 1.7$  Ma (MSWD=0.34),表明雅满苏铁矿床形成不晚于 325 Ma。雅满苏上亚组英安岩和玄武岩显示了富集 LREE、U、Sr,相对亏损 Nb、Ta 等元素的特征,且英安岩锆石的  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$  比值介于 0.282 644~0.282 802 之间,  $\epsilon\text{Hf}(334\text{ Ma})$  为 3.0~8.0,表明它们是活动大陆边缘弧环境的产物,英安岩是新生地壳物质部分熔融的结果,玄武岩是软流圈地幔与受俯冲板片流体交代地幔的混合熔体演化的产物。结合前人研究成果,认为雅满苏组火山岩是早石炭世中期古亚洲洋俯冲作用的产物,石炭纪时期古亚洲洋尚未闭合,雅满苏铁矿床形成介于 334~325 Ma 之间,是与石炭纪火山岩有成因联系的铁矿床。

**关键词:** 雅满苏组; 火山岩; LA-ICP-MS 锆石定年; 地球化学; 东天山

中图分类号: P597+.3; P588.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)05-0768-23

## Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Yamansu Formation in eastern Tianshan Mountains and their tectonic implications

WANG Wen<sup>1</sup>, XIA Fang<sup>1</sup>, CHAI Feng-mei<sup>1</sup>, WU Sheng-jun<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>3</sup>, GENG Xin-xia<sup>3</sup>  
and MENG Qing-peng<sup>4</sup>

(1. Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi 830049, China; 2. No. 1 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 831100, China; 3. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Xinjiang Mineral Experiment Research Institute, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** The Yamansu Formation, outcropped along the Aqishan-Yamansu belt, is a Late Paleozoic stratigraphic unit that hosts many important iron metallogenetic deposits in eastern Tianshan orogenic belt, Xinjiang. The Yamansu Formation consists of intercalated volcanic and sedimentary rocks. LA-ICP-MS U-Pb analyses of zircons from dacite in the upper part of the Yamansu Formation and syenite cutting across the skarns and iron orebodies in the Yamansu iron deposit area yielded weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of  $334.4 \pm 1.7$  Ma (MSWD=0.67) and  $325.5 \pm 1.7$  Ma (MSWD=0.34), respectively. These ages indicate that the Yamansu Formation was formed during the early Carboniferous and the Yamansu iron orebodies and mineralizations preferentially occurred between 334 and 325 Ma. Geochemically, the dacite displays typical arc-like magmatic rocks characteristics, e. g., enrichment

收稿日期: 2016-05-01; 接受日期: 2016-08-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”资助项目(2012CB416803); 国土资源部公益性行业科研专项经费资助项目(201211073-03)

作者简介: 王 雯(1990-), 女, 在读硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 449205620@qq.com; 通讯作者: 夏 芳(1981-), 女, 实验师, 主要从事岩石、矿物工作, E-mail: xiafang0001@163.com。

of large ion lithophile elements (LILE) and light rare earth element (LREE), strong negative anomalies of Nb, Ta and Ti with positive  $\epsilon\text{Hf}(t)$  values (+3.0 to +8.0), and relatively young Hf crustal model ages. They were probably derived from the dehydration melting of juvenile crustal materials with minor mantle melting and underwent fractional crystallization during the upward migration of magma. The basalts resemble dacites in enrichment of LREE, U and Sr and depletion of Nb, Ta, Zr and Hf, and were probably derived from depleted mantle and mantle wedge modified by fluids from subducted materials. The regional geology and geochemical evidence indicate that the Yamansu Formation volcanic rocks were formed during the early Carboniferous in an active continental margin arc tectonic setting, indicating that the Paleo-Asia Ocean had not been closed. The Yamansu Fe deposit hosted in the Yamansu Formation was formed during 334~325 Ma, closely associated with Late Paleozoic volcanism.

**Key words:** volcanic rocks; geochemistry; LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating; Eastern Tianshan

**Fund support:** National Basic Research Program of China (2012CB416803); Ministry of Land and Resources Public Welfare Industry Special Funds for Scientific Research Project (201211073-03)

东天山地区古生代岩浆活动频繁,发育大量火山岩,与铁、铜和铁铜金等金属成矿关系密切。位于康古尔断裂和阿奇克库都克-沙泉子断裂之间的觉罗塔格构造带的火山岩极为发育,并且以苦水断裂为界南北有特征明显不同的岩相带,可进一步划分为小热泉子-镜儿泉火山岩带(北带)、康古尔-黄山韧性剪切带(中带)和阿齐山-雅满苏火山岩(南带)(董连慧等,2005<sup>①</sup>)。其中阿齐山-雅满苏火山岩带长约500 km,宽30~80 km,面积约25 000 km<sup>2</sup>,呈近东西向带状延伸,石炭纪火山岩尤为发育,并且在这些石炭纪火山岩中赋存有红云滩、百灵山、突出山、雅满苏、沙泉子、黑峰山等多个铁多金属矿床(图1)。前人对阿齐山-雅满苏带内的火山岩及相关的侵入岩开展过一定程度的研究,在它们的时空分布、岩石组合、含矿性及物质来源和演化等方面取得了重要进展(宋治杰等,1982;李文明等,2002;吴昌志等,2006;方维萱等,2006;侯广顺等,2007;苏春乾等,2009;周涛发等,2010;罗婷等,2012;黄小文等,2012;Huang *et al.*, 2013; Hou *et al.*, 2014a, 2014b;李厚民等,2014)。然而,对东天山地区石炭纪时期火山岩的构造背景存在有岛弧(冯京等,2007;李永军等,2007;李源等,2011)、裂谷(顾连兴等,2001;陈丹玲等,2001;夏林圻等,2002;秦克章等,2003)和地幔柱(夏林圻等,2004)的争议,对古亚洲洋闭合时间的认识有早石炭世(夏林圻等,2002;王强等,2006)、中石炭世(李文明等,2002)和晚石炭世(张洪瑞等,2010)等不同观点;对赋存于石炭纪火山岩中的铁多金属矿床的形

成时代及成因等也有不同的认识(王登红等,2006;陈毓川等,2008;张增杰等,2012;张立成等,2013;Huang *et al.*, 2013;Hou *et al.*, 2014a, 2014b;李厚民等,2014)。赋存矿床的火山岩研究可以为解决这些争议提供重要信息。

本文对东天山阿奇山-雅满苏带内与铁多金属矿床有关的雅满苏组火山岩进行了详细的年代学、岩石学和地球化学研究,以期建立东天山地区晚古生代火山岩的年代学格架,探讨该区晚古生代时期大地构造背景以及岩浆作用与赋存的铁矿床关系提供新资料。

## 1 区域地质背景

阿齐山-雅满苏地区位于东天山觉罗塔格构造带南部,雅满苏断裂和阿奇克库都克之间,西起秋明塔格、阿奇山,向东经过十里坡、黑龙峰、路白山,穿库姆塔格沙垅经雅满苏、景峡,东至寨北山以东地区。出露地层以石炭纪火山-沉积岩为主(主要为下石炭统雅满苏组、干墩组、上石炭统土古土布拉克组、梧桐窝子组和脐山组),以发育雅满苏组双峰式火山岩和沉积岩夹层为特征(马瑞士等,1993;冯益民等,2002),也有少量零星分布的二叠纪火山沉积地层,呈东西向带状分布(苏春乾等,2009)。大部分地区的岩层产状平缓,并且随地质时代和地域不同,其岩性随之变化,如石炭纪火山活动自北而南,自下而上,自半深海相的火山沉积建造过渡为浅海相陆源中酸性岩建造及浅海-滨海相大陆拉斑玄武

① 董连慧,崔彬,屈迅,等. 2005. 东天山中段铜矿找矿靶区评价及大型矿床定位预测报告.

岩建造,零星分布的二叠纪火山-沉积建造则自北而南由海相向陆相过渡(姬金生等,2001<sup>①</sup>)。区内石炭-二叠纪侵入岩也广泛发育,见少量三叠纪侵入岩,其中石炭纪侵入岩沿阿其克库都克-沙泉子断裂北缘分布,为辉长岩-闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长岩-斜长花岗岩-二长花岗岩(花岗岩)组合;二叠纪侵入岩以钾长花岗岩为主;三叠纪侵入岩仅见零星分布的二长花岗岩和钾长花岗岩(董连慧等,2009<sup>②</sup>;

张达玉等,2010)。阿齐山-雅满苏带也是东天山地区重要的多金属成矿带之一,主要发育有火山沉积-热液作用有关的火山岩型铁铜矿床[红云滩铁矿、百灵山含钴铁矿、雅满苏铁锌钴矿、沙泉子铁铜矿、黑峰山铁(铜)矿],与火山沉积作用有关的十里坡自然铜矿,与华力西中晚期岩浆侵入活动有关的铁岭砭卡岩型铜矿床、维权和双井子银矿床等(董连慧等,2009<sup>③</sup>)(图1)。

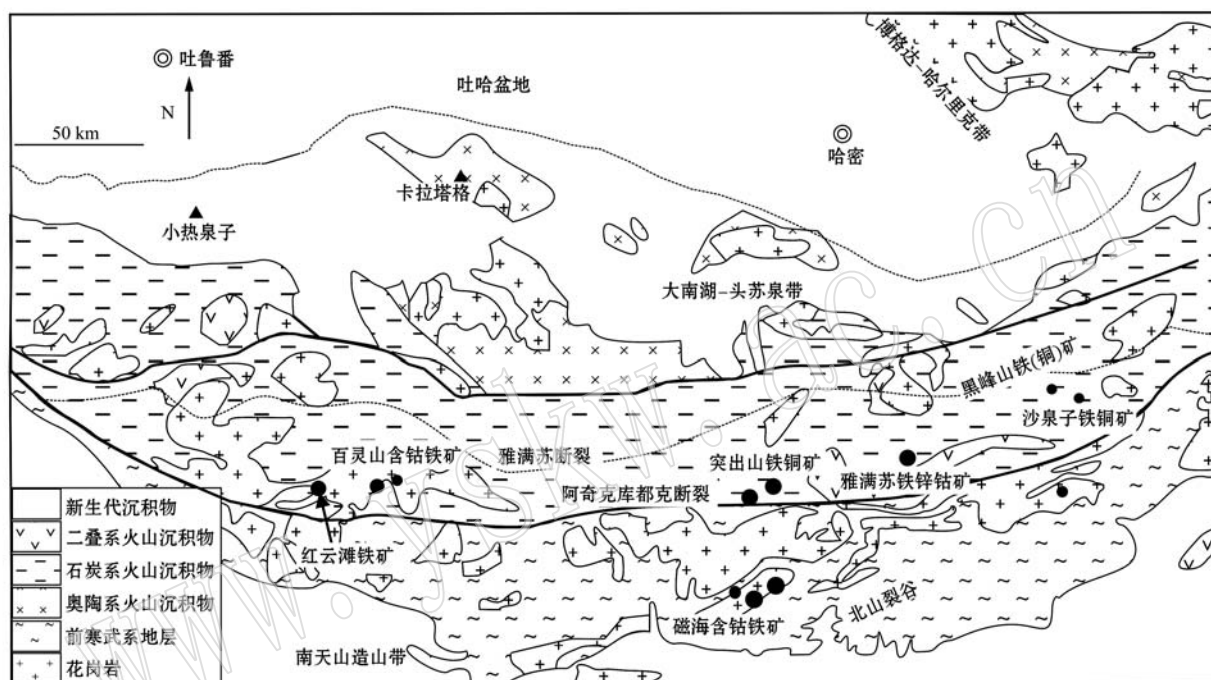


图1 阿齐山-雅满苏地区区域地质火山岩分布略图(据苏本勋等,2010;新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队,2005<sup>④</sup>)

Fig. 1 Geological sketch map showing distribution of the volcanic rocks in the Aqishan-Yamansu belt (modified after Su Benxun *et al.*, 2010; No. 6 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2005<sup>④</sup>)

## 2 火山岩地质及岩相学

雅满苏组是1958年新疆地质局第一区测大队开展1:20万烟墩幅区域地质调查时创建并命名的,为一套浅海相基性-中酸性火山岩夹碳酸盐岩和碎屑岩组合。该地层受雅满苏断裂控制,总体近东西

向展布,出露范围较广,主要分布于阿其克库都克大断裂以北地区雅满苏铁多金属矿床幅及南湖戈壁幅中部及南部,整合覆盖于小热泉子组(或土古土布拉克组,不同地区名称不同)之上,并被不同时代的新地层呈角度不整合覆盖(新疆维吾尔自治区地质局第一区测大队,1958<sup>④</sup>;新疆地质矿产勘查开发局第一区域地质调查大队,2005a<sup>⑤</sup>,2005b<sup>⑥</sup>)。多年来,该地

① 姬金生,杨兴科,刘光海,等. 2001. 觉罗塔格金、铜成矿带成矿系列分布规律研究与矿床定位预测成果报告.

② 董连慧,冯京,杨在峰,等. 2009. 新疆东天山典型示范区铁铜成矿规律与矿产预测成果报告.

③ 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队. 2005. 雅满苏铁铜矿床地质调查报告.

④ 新疆维吾尔自治区地质局第一区测大队. 1958. 新疆哈密1:20万烟墩幅(K46-X VII)地质矿产图说明书.

⑤ 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一区域地质调查大队. 2005a. 新疆鄯善县阿拉塔格北一带(K46E014006幅, K46E014007幅, K46E014008幅)1:5万区域地质矿产调查报告.

⑥ 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一区域地质调查大队. 2005b. 新疆哈密市夹白山一带(K46E013007幅, K46E013008幅, K46E013009幅, K46E013010幅)1:5万区域地质矿产调查报告.

层组合及时代先后经过多次修正,目前根据岩性组合划分为上下两个亚组(新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队,1979<sup>①</sup>,2005a<sup>②</sup>,2005b<sup>③</sup>;新疆维吾尔自治区地质矿产局,1993),其中下亚组为中酸性火山岩(火山碎屑岩为主,少量安山岩、英安岩)夹少量玄武岩和碳酸盐岩及沉火山碎屑岩组合,可分为4个岩性段;上亚组为火山碎屑岩夹陆源碎屑岩、碳酸盐岩和少量熔岩,地层出露厚度和岩性沿走向不稳定,与下伏雅满苏下亚组呈断层接触,并较下亚组沉积岩明显增加,可分为5个岩性段(新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队,2005a<sup>②</sup>,2005b<sup>③</sup>)。雅满苏组是阿奇山-雅满苏成矿带内众多铁多金属矿床的赋矿地层之一,如由西至东分布的红云滩铁矿、阿奇山铁矿、库姆塔格

铁矿和雅满苏铁矿均赋存于雅满苏组火山岩中。这些矿床的含矿层位与赋矿岩石组合各不相同(柴凤梅等,2015<sup>④</sup>)。

雅满苏铁矿床是东天山地区产于海相火山岩中的一中型铁多金属矿床,矿体赋存于雅满苏上亚组第三岩性段火山岩夹碎屑岩中。雅满苏铁矿侵入岩很不发育,仅在矿区北部出露有二叠纪闪长岩、二长花岗岩和斑状钾长花岗岩,均侵入于石炭纪苦水混杂岩带中。矿区内脉岩发育,分布广泛,从基性到酸性均有出露,以中酸性脉岩为主,主要有辉绿岩脉、闪长岩脉、正长岩脉、细晶岩脉以及石英脉等。其中见正长岩脉切穿雅满苏上亚组地层和矿区矽卡岩(图2)。

在雅满苏铁矿实测的一条剖面上(图3),主要

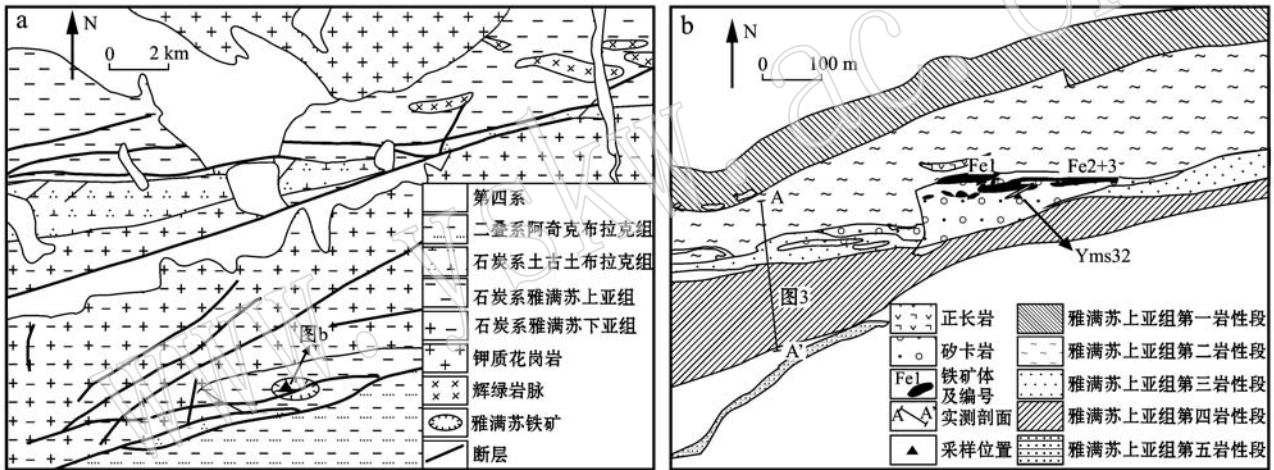


图2 雅满苏铁矿床矿区地质简图(据新疆维吾尔自治区地质矿产勘探开发局第六地质大队,2005a<sup>②</sup>)

Fig. 2 Geological map of the Yamansu Fe ore deposit (after No. 6 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2005a<sup>②</sup>)

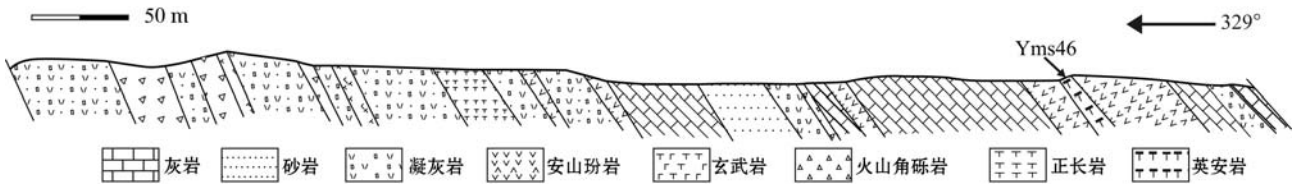


图3 雅满苏铁矿雅满苏组实测剖面及采样位置图

Fig. 3 Stratigraphic section of the Yamansu Formation in the Yamansu Fe ore district, showing sampling sites

- ① 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队. 1979. 新疆哈密县烟墩-苦水一带 1:5 万区域地质矿产调查报告.
- ② 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队. 2005a. 雅满苏铁矿床地质调查报告.
- ③ 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队. 2005b. 新疆哈密市阿拉塔格一带铜铁矿普查报告.
- ④ 柴凤梅,刘 锋,张志欣,等. 2015. 东天山铁铜多金属矿床综合研究报告.



为雅满苏上亚组的英安质凝灰岩、安山质凝灰岩、玄武质凝灰岩、玄武岩、英安岩、灰岩和陆源碎屑岩组合,火山岩有:

玄武岩:岩石呈灰绿-灰黑色,斑状结构,块状构造。斑晶(15%~20%)主要由自形辉石(斑晶总量的45%)和斜长石(斑晶总量的55%)组成,偶见角闪石,基质主要为辉石、斜长石和玻璃质组成。其中,辉石多呈自形短柱状,多已蚀变为绿泥石和绿帘石,斜长石晶体相对小且呈半自形,双晶发育;玄武岩基质(80%~85%)(图4a,4b)。

安山质凝灰岩:岩石呈灰色,凝灰结构,块状构造。主要由晶屑(15%)、岩屑(15%)和火山灰胶结物(70%)组成。晶屑主要为斜长石,呈半自形-自形板状,约0.2~1.7 mm,普遍发生了弱高岭土化和绢云母化。岩屑为不规则状,大小悬殊,0.1 mm×0.8 mm~0.5 mm×2 mm,主要为安山岩,多已绿泥石化。火山灰中局部可见斜长石小晶屑定向排列(图4c)。

流纹质凝灰岩:岩石呈灰红色,凝灰结构,块状构造。主要由晶屑(8%~15%)、岩屑(3%~7%)和凝灰质胶结物(85%~90%)组成,新生的鳞片状绿泥石、绢云母矿物少,略定向。晶屑主要为棱角-次棱角状长石和石英,长石均已土化和绢云母化等。岩屑为棱角-次棱角状流纹质岩石。胶结物多脱玻变为霏细状长石、石英,局部隐约可见鸡骨状、弧面棱角状(图4d)。

英安岩:岩石呈灰色,斑状结构,块状构造。斑晶含量约30%,基质含量约70%。斑晶主要为钠长石(约占斑晶总量的50%)、石英(约占斑晶总量的30%)和角闪石(约占斑晶总量的10%)组成。其中斜长石常呈半自形长板状,大小约0.1 mm×0.5 mm,也见它形。石英为它形粒状分布,角闪石呈半自形晶。基质主要为隐晶质-微晶长英质(图4e)。也见磁铁矿无定向散乱分布于基质中。岩石有磁性。

火山角砾岩:岩石呈浅灰、灰白色,火山角砾结构,块状构造。由火山角砾、岩屑、晶屑、玻屑和胶结物组成,其中火山角砾呈棱角状、椭圆状、扁豆状散乱分布(图4f)。

正长岩:岩石呈砖红色,中细粒结构,块状构造,切穿含磁铁矿石榴石砂卡岩,并与之有清晰界线。主要由钾长石(约70%)、斜长石(约10%)、少量暗色矿物和石英组成。其中钾长石呈半自形-

自形宽板状,大小约0.5 mm×1.5 mm。斜长石呈它形长板状,大小约0.1 mm×0.5 mm(图4g,4h,4i),暗色矿物主要为角闪石。

### 3 年代学

本文对雅满苏铁多金属矿区雅满苏上亚组的英安岩(Yms46)和切穿矽卡岩及磁铁矿体的正长岩脉(Yms32)开展了锆石 U-Pb 年代学研究。按照常规方法挑选锆石晶体和制靶。锆石 U-Pb 定年测试分析在中国地质科学院矿产资源研究所 LA-MC-ICP MS 实验室完成。详细分析原理和流程可参考侯可军等(2009)。分析结果列于表1。

英安岩定年样品中的锆石呈半自形-自形的长柱状及双锥状晶体,晶棱及晶面清楚,颗粒相对较小,长径变化于80~150  $\mu\text{m}$  之间,长短径比为1:1~2:1,所有锆石显示清晰震荡环带,个别锆石含有不透明包裹体,且所测锆石的 Th/U 比值介于0.50~1.19 之间,表明它们均为典型的岩浆结晶锆石(Rubatto, 2002),且没有发生 Pb 的丢失。获得的23个有效分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据比较集中,介于342.8~328.0 Ma 之间,在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 协和图上,数据点聚集在谐和线两侧及其附近一个较小的区域范围内,它们的加权平均年龄为 $334.4 \pm 1.7$  Ma(MSWD=0.67)(图5),代表了英安岩的喷发年龄。

正长岩脉中的锆石多呈无色-浅褐黄色,半自形-自形的长柱状及双锥状晶体,晶棱及晶面清楚。锆石颗粒长约30~60  $\mu\text{m}$ ,长宽比介于1:1~2:1 之间,所有锆石显示岩浆锆石的生长环带,30粒锆石分析点的 Th/U 比值介于0.71~1.53 之间,其中26粒(2,3,16和30点除外)锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于319~330 Ma 之间,它们聚集在谐和线两侧及其附近一个较小的区域范围内,其加权平均值为 $325.5 \pm 1.7$  Ma(MSWD=0.34)(图5),可以代表正长岩的形成年龄。

从上述定年结果可以看出,火山岩的年龄与地层中维宪期化石的形成年龄一致,火山岩较正长岩形成早,符合地质事实。根据最新的国际地质年代划分方案(Gradstein *et al.*, 2004)和我国惯用的地质年代划分方案(全国地层委员会, 2002),它们同属早石炭世中期岩浆活动的产物。

表 1 雅满苏铁矿区雅满苏上亚组英安岩和正长岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon dating of the dacite from the upper part of Yamansu Formation and syenite in the Yamansu Fe ore district

样品点号	元素含量( $\text{wt}\%/10^{-6}$ )				同位素比值				年龄(Ma)			
	Pb	Th	U	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	
					1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$
Yms46-1	1059.05	46.61	61.77	0.75	0.054 613	0.002 296	0.053 917	0.001 809	0.404 800	0.017 356	342.8	14.0
Yms46-2	450.31	43.87	63.77	0.69	0.053 951	0.000 844	0.054 916	0.001 307	0.408 470	0.011 335	338.7	5.2
Yms46-3	72.34	52.15	64.00	0.81	0.053 119	0.001 144	0.053 230	0.004 957	0.391 586	0.041 178	333.6	7.0
Yms46-4	837.97	61.07	74.95	0.81	0.054 237	0.003 562	0.056 179	0.004 548	0.419 575	0.040 100	340.5	21.8
Yms46-5	267.12	49.56	83.95	0.59	0.051 296	0.000 700	0.061 284	0.001 893	0.437 157	0.019 563	322.5	4.3
Yms46-6	1 062.2	126.71	123.88	1.02	0.054 239	0.000 426	0.055 478	0.000 696	0.414 788	0.005 888	340.5	2.6
Yms46-7	1 224.55	128.37	171.87	0.75	0.053 194	0.001 037	0.051 734	0.002 593	0.379 385	0.019 067	334.1	6.3
Yms46-8	203.63	27.50	54.84	0.50	0.052 560	0.000 836	0.055 562	0.001 992	0.403 788	0.016 345	330.2	5.1
Yms46-9	8.70	29.81	55.40	0.54	0.054 566	0.001 953	0.055 819	0.002 946	0.420 815	0.027 732	342.5	11.9
Yms46-10	592.36	44.95	77.44	0.58	0.049 644	0.001 025	0.056 005	0.002 699	0.381 760	0.016 342	312.3	6.3
Yms46-11	473.12	97.31	134.37	0.72	0.053 228	0.000 411	0.055 874	0.000 756	0.410 010	0.006 284	334.3	2.5
Yms46-12	301.28	58.68	63.68	0.92	0.052 203	0.001 065	0.053 182	0.001 932	0.382 428	0.015 745	328	6.5
Yms46-13	48.62	17.95	33.42	0.54	0.053 382	0.001 343	0.056 111	0.003 158	0.407 021	0.021 496	335.3	8.2
Yms46-14	205.34	34.45	65.27	0.53	0.054 514	0.001 055	0.078 887	0.002 105	0.594 333	0.020 947	342.2	6.5
Yms46-15	223.43	34.59	52.23	0.66	0.053 145	0.001 441	0.056 674	0.002 97	0.412 654	0.022 439	333.8	8.8
Yms46-16	223.63	58.26	74.52	0.78	0.050 931	0.001 529	0.077 269	0.003 235	0.552 607	0.038 785	320.2	9.4
Yms46-17	299.71	79.65	88.14	0.90	0.052 609	0.000 669	0.053 990	0.001 479	0.390 957	0.010 384	330.5	4.1
Yms46-18	164.34	116.82	110.66	1.06	0.052 973	0.000 498	0.057 551	0.000 955	0.420 604	0.008 352	332.7	3.0
Yms46-19	177.13	59.72	60.84	0.98	0.053 587	0.000 661	0.055 542	0.001 062	0.408 807	0.008 368	336.5	4.0
Yms46-20	65.31	37.58	66.49	0.57	0.052 792	0.000 781	0.053 145	0.001 560	0.387 974	0.014 489	331.6	4.8
Yms46-21	111.08	64.21	72.24	0.89	0.053 108	0.000 629	0.055 160	0.001 106	0.403 595	0.009 352	333.6	3.9
Yms46-22	112.05	109.00	94.35	1.16	0.052 985	0.000 661	0.054 529	0.000 888	0.398 753	0.008 585	332.8	4.0
Yms46-23	25.17	80.05	87.51	0.91	0.053 012	0.000 984	0.058 280	0.004 949	0.424 293	0.035 293	333.0	6.0
Yms46-24	21.96	39.57	51.08	0.77	0.053 195	0.000 810	0.053 885	0.002 388	0.395 903	0.019 056	334.1	5.0
Yms46-25	64.79	66.23	56.26	1.18	0.053 658	0.001 056	0.057 293	0.001 711	0.423 090	0.014 606	336.9	6.5
Yms46-26	100.21	117.71	127.18	0.93	0.053 356	0.000 363	0.056 162	0.000 810	0.412 758	0.006 268	335.1	2.2
Yms46-27	12.32	28.56	36.36	0.79	0.053 718	0.000 709	0.055 397	0.001 358	0.408 528	0.010 443	337.3	4.3
Yms46-28	103.10	97.55	116.46	0.84	0.052 544	0.000 415	0.055 046	0.000 574	0.397 846	0.004 679	330.1	2.5
Yms46-29	46.49	67.29	85.75	0.78	0.054 206	0.000 449	0.063 847	0.001 196	0.478 711	0.010 675	340.3	2.7
Yms46-30	134.53	117.24	98.34	1.19	0.054 062	0.001 081	0.053 421	0.002 038	0.398 584	0.017 352	339.4	6.6

样品编号: Yms46 (英安岩)

续表 1

Continued Table 1

样品点位	元素含量( $w_B/10^{-6}$ )			Th/U	同位素比值				年龄(Ma)							
	Pb	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					
					1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$	1 $\sigma$				
						样品编号: Yms32 (正长岩)										
Yms32-1	10.92	38.14	53.89	0.71	0.051376	0.000660	0.055809	0.001342	0.396663	0.011539	323	4.05	456	53.70	339	8.39
Yms32-2	19.97	22.18	24.34	0.91	0.048501	0.001243	0.052496	0.001966	0.351556	0.016000	305	8.00	306	85.18	306	12.02
Yms32-3	74.36	56.14	46.54	1.21	0.049119	0.000582	0.052732	0.001116	0.356324	0.007954	309	4.00	317	15.74	309	5.95
Yms32-4	0.70	32.02	29.60	1.08	0.052364	0.001784	0.056214	0.002661	0.403616	0.018743	329	10.93	461	103.69	344	13.56
Yms32-5	33.32	18.47	21.79	0.85	0.051213	0.000907	0.054332	0.001252	0.380705	0.009641	322	5.56	383	51.85	328	7.09
Yms32-6	19.53	92.65	108.96	0.85	0.050756	0.001668	0.054782	0.004718	0.382569	0.020538	319	10.24	467	194.42	329	15.08
Yms32-7	26.57	33.18	42.81	0.77	0.051253	0.001452	0.057462	0.004882	0.402138	0.032187	322	8.90	509	188.87	343	23.31
Yms32-8	81.49	65.62	64.98	1.01	0.051677	0.000973	0.055589	0.001533	0.396724	0.014360	325	5.96	435	61.11	339	10.44
Yms32-9	51.45	61.11	65.27	0.94	0.052115	0.000489	0.055867	0.001127	0.401838	0.009189	327	3.00	456	16.67	343	6.66
Yms32-10	59.86	58.35	52.55	1.11	0.052192	0.000611	0.055445	0.001072	0.397800	0.007850	328	3.75	432	42.59	340	5.70
Yms32-11	219.55	172.56	104.03	1.66	0.051760	0.001285	0.053914	0.001549	0.386992	0.018929	325	7.88	369	64.81	332	13.86
Yms32-12	386.52	84.07	60.41	1.39	0.051643	0.001488	0.055716	0.002827	0.398551	0.027085	325	9.12	443	112.95	341	19.67
Yms32-13	224.41	80.86	82.81	0.98	0.051340	0.000470	0.053698	0.000665	0.379783	0.005583	323	2.88	367	27.78	327	4.11
Yms32-14	191.48	68.05	44.35	1.53	0.052231	0.000561	0.054732	0.001050	0.393767	0.008558	328	3.44	467	37.96	337	6.23
Yms32-15	77.96	23.17	31.76	0.73	0.051564	0.000925	0.053079	0.002016	0.377489	0.016252	324	5.67	332	87.03	325	11.98
Yms32-16	250.41	35.51	39.80	0.89	0.055635	0.001648	0.081406	0.006859	0.625948	0.057346	349	10.00	1231	165.28	494	35.83
Yms32-17	6.35	61.91	76.78	0.81	0.052000	0.000733	0.055249	0.002211	0.396351	0.017291	327	4.49	433	88.88	339	12.57
Yms32-18	575.56	60.83	81.37	0.75	0.052402	0.001467	0.056037	0.001654	0.405719	0.018647	329	8.99	454	64.81	346	13.47
Yms32-19	350.16	70.55	75.50	0.93	0.052594	0.000547	0.054519	0.000900	0.395388	0.007623	330	3.35	391	37.03	338	5.55
Yms32-20	654.12	86.57	90.03	0.96	0.052089	0.000546	0.055584	0.000893	0.399094	0.007545	327	3.34	435	37.03	341	5.48
Yms32-21	377.19	29.16	27.92	1.04	0.051282	0.001607	0.055314	0.003854	0.389343	0.027188	322	9.86	433	155.54	334	19.87
Yms32-22	409.14	65.68	90.50	0.73	0.052154	0.000642	0.054903	0.000873	0.394943	0.008078	328	3.93	409	35.18	338	5.88
Yms32-23	204.33	27.40	43.03	0.64	0.051764	0.000745	0.055565	0.001546	0.396381	0.012373	325	4.57	435	61.11	339	9.00
Yms32-24	150.43	31.84	50.75	0.63	0.051876	0.000517	0.055571	0.001264	0.395806	0.009104	326	3.17	435	50.00	339	6.62
Yms32-25	612.61	91.32	86.29	1.06	0.051461	0.000480	0.056036	0.000908	0.397228	0.007078	323	2.94	454	41.66	340	5.14
Yms32-26	243.60	69.63	82.66	0.84	0.051446	0.000564	0.055186	0.000961	0.391273	0.007890	323	3.46	420	34.26	335	5.76
Yms32-27	198.34	53.34	86.76	0.61	0.051414	0.000494	0.055522	0.000827	0.393752	0.006953	323	3.03	432	33.33	337	5.07
Yms32-28	203.90	94.78	104.74	0.90	0.051373	0.001633	0.055707	0.003362	0.396663	0.032528	323	10.01	439	133.32	339	23.65
Yms32-29	256.60	73.94	87.49	0.85	0.051848	0.001183	0.055012	0.002196	0.389529	0.011845	326	7.25	413	88.88	334	8.66
Yms32-30	98.00	47.57	66.32	0.72	0.050582	0.000607	0.058439	0.002472	0.414149	0.023083	318	4.00	546	92.58	352	16.58

样品编号: Yms32 (正长岩)

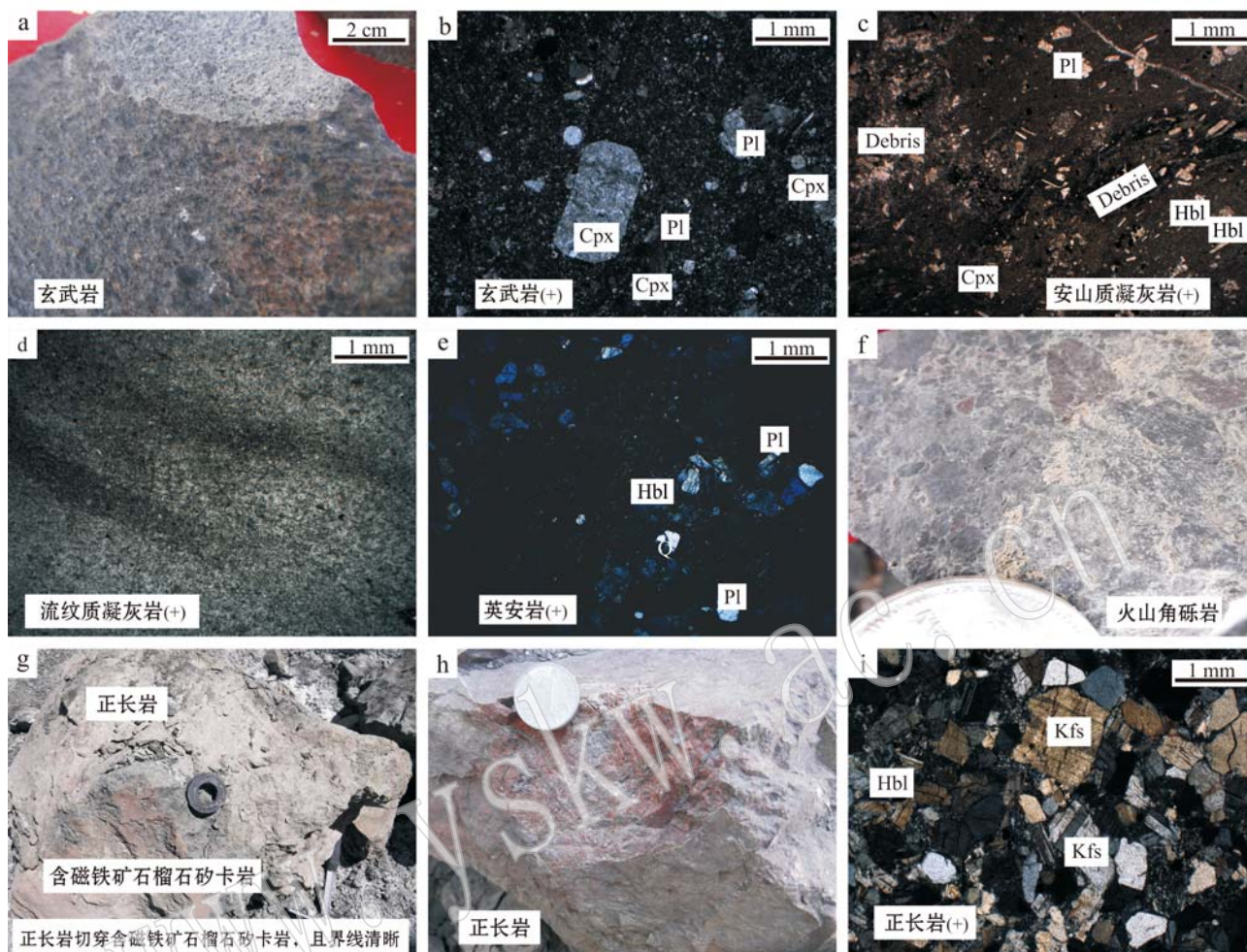


图4 雅满苏铁矿区雅满苏组火山岩照片

Fig. 4 Representative photographs of the volcanic rocks from the Yamansu Formation in the Yamansu Fe ore district

a—玄武岩手标本, 灰黑色, 斑状结构, 长板状自形斜长石斑晶; b—玄武岩具斑状结构, 自形单斜辉石和斜长石斑晶; c—安山质凝灰岩, 见少量安山岩岩屑, 斜长石、角闪石和单斜辉石和晶屑, 火山灰胶结; d—流纹质凝灰岩, 见少量晶屑和岩屑, 略定向, 胶结物见脱玻化; e—英安岩, 斑状结构, 见钠长石、角闪石和石英斑晶; f—火山角砾岩, 见棱角状酸性岩角砾; g—正长岩切穿含磁铁矿石榴石矽卡岩; h—砖红色中细粒正长岩; i—正长岩, 中细粒结构, 主要由钾长石、角闪石和少量斜长石组成; Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Hbl—角闪石; Debris—碎屑

a—basalt species showing porphyritic texture; b—euhedral clinopyroxene and plagioclase phenocrysts in basalt thin section; c—andesitic tuff including debris and crystal fragments; d—oriented debris and crystal fragments with devitrification cements in rhyolitic tuff; e—dacite hosting magnetite; f—acidic volcanic breccia; g—magnetite-bearing garnet skarn cut by syenite; h—fine grained syenite; i—syenite consisting of potassium feldspar, hornblende; Cpx—clinopyroxene; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Hbl—hornblende; Debris—debris

## 4 元素地球化学

用于地球化学研究的样品采自雅满苏铁矿区雅满苏上亚组(8件玄武岩、7件英安岩)。主量、微量和稀土元素分析在国家地质测试中心完成, 主量元素采用X荧光光谱仪(PW4400)测定, 微量元素和稀

土元素采用等离子质谱仪(X-series)测定。结果列于表2。

雅满苏铁矿区火山岩样品在 $\text{SiO}_2 - \text{Zr}/\text{TiO}_2$ 图中(图6a)位于英安岩区和玄武岩区, 与岩相学的观察一致。玄武岩的 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{MgO}$ 含量分别为46.48%~48.93%和4.06%~5.59%, 它们有高的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (17.82%~19.50%)、 $^{\text{T}}\text{FeO}$ (8.42%~11.26%)和 $\text{CaO}$

表 2 雅满苏铁矿床矿区火山岩主量元素( $w_B/\%$ )和微量元素( $w_B/10^{-6}$ )分析结果  
Table 2 Major elements ( $w_B/\%$ ) and trace elements ( $w_B/10^{-6}$ ) composition of volcanic rocks from the Yamansu Fe ore district

样号	玄武岩										英安岩				
	Yms38	Yms39	Yms40	Yms41	Yms42	Yms43	Yms44	Yms45	Yms98	Yms100	Yms101	Yms102	Yms103	Yms104	Yms105
SiO <sub>2</sub>	48.48	47.80	47.07	46.59	46.90	48.93	46.48	47.45	67.30	65.84	64.02	67.40	66.53	65.43	66.43
TiO <sub>2</sub>	0.82	0.76	0.73	0.80	0.80	0.74	0.84	0.83	0.80	0.84	0.79	0.74	0.83	0.84	0.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.82	18.22	17.84	18.34	18.30	18.66	18.72	19.50	11.61	11.39	11.49	11.29	11.56	11.97	11.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.96	6.00	7.16	6.44	5.89	3.22	4.92	3.08	4.05	5.12	5.64	4.27	4.41	4.52	4.90
FeO	3.77	4.42	4.19	4.33	4.69	5.16	5.66	6.84	1.02	0.70	0.54	0.83	0.69	0.88	0.41
MnO	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.21	0.19	0.23	0.11	0.13	0.14	0.10	0.11	0.12	0.11
MgO	4.81	5.13	5.21	5.24	5.59	4.06	5.29	5.24	0.68	0.45	0.30	0.57	0.45	0.63	0.29
CaO	7.08	7.86	7.55	8.79	7.99	6.48	8.59	5.24	6.74	8.74	10.11	7.32	8.06	8.46	8.62
Na <sub>2</sub> O	5.43	5.08	5.00	4.56	4.83	6.12	4.46	5.11	3.66	2.60	2.94	3.56	3.26	3.68	2.90
K <sub>2</sub> O	0.33	0.13	0.31	0.1	0.1	0.5	0.08	0.82	0.86	0.87	0.14	0.58	0.78	0.46	0.81
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.09	0.09	0.04	0.26	0.26	0.25	0.24	0.26	0.30	0.26
CO <sub>2</sub>	0.77	0.60	0.77	0.86	0.51	2.31	0.26	0.77	1.63	1.63	2.14	1.63	1.67	2.49	1.63
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	2.82	3.20	2.82	2.62	2.98	2.60	3.56	3.68	0.56	0.46	0.62	0.58	0.49	0.52	0.88
LOI	3.74	3.91	4.20	4.05	4.13	5.07	4.11	4.87	2.21	2.53	3.12	2.83	2.64	2.93	2.61
A/NK	1.93	2.16	2.10	2.43	2.28	1.77	2.54	2.11	1.68	2.20	2.32	1.75	1.87	1.84	2.05
A/CNK	0.81	0.80	0.81	0.78	0.81	0.84	0.82	1.04	0.61	0.54	0.49	0.57	0.56	0.55	0.54
TFeO	10.58	10.34	11.26	10.69	10.54	8.42	10.60	10.01	4.81	5.49	5.84	4.83	4.81	5.10	4.97
Mg <sup>#</sup>	0.47	0.49	0.48	0.49	0.51	0.49	0.50	0.52	0.21	0.13	0.09	0.18	0.15	0.19	0.10
Fe <sup>#</sup>	0.53	0.51	0.52	0.51	0.49	0.51	0.50	0.48	0.79	0.87	0.91	0.82	0.85	0.81	0.90
Sc	44.40	43.20	41.70	44.10	46.70	35.50	45.40	45.00	23.60	25.60	24.40	20.90	24.60	24.40	24.00
V	297.00	349.00	329.00	368.00	338.00	241.00	327.00	269.00	49.20	54.90	51.20	41.70	49.90	47.40	50.40
Cr	47.80	49.20	50.10	46.90	53.70	9.03	28.80	8.40	6.81	7.88	7.31	8.96	9.28	8.89	6.26
Co	48.20	45.70	41.80	47.10	50.30	33.00	43.10	35.70	5.81	5.39	5.99	4.90	4.65	5.85	4.39
Ni	18.10	19.40	20.90	18.90	19.60	8.17	18.00	9.44	6.29	7.58	8.36	6.47	7.34	7.84	6.79
Cu	11.70	8.64	74.90	9.16	9.55	33.30	18.20	4.48	4.97	5.87	7.07	3.73	5.46	6.99	4.03
Zn	94.30	100.00	100.00	96.30	108.00	216.00	99.00	233.00	47.00	32.30	27.00	35.30	32.50	40.10	24.80
Ga	19.00	20.30	20.60	20.00	19.90	17.50	20.90	21.60	16.40	19.50	20.50	15.30	17.80	17.80	18.10
Rb	6.50	2.94	6.18	2.75	2.25	18.00	2.11	42.00	11.80	12.10	2.10	7.70	10.60	6.55	10.60
Sr	152.00	103.00	114.00	149.00	126.00	382.00	136.00	212.00	665.00	911.00	901.00	664.00	804.00	756.00	883.00
Y	12.20	11.40	10.10	12.90	12.00	17.80	14.80	15.80	41.20	42.80	40.00	35.80	40.90	41.80	39.80
Zr	23.30	22.30	20.50	22.00	21.60	29.20	25.40	32.80	126.00	135.00	118.00	112.00	126.00	130.00	123.00
Nb	0.81	0.68	0.61	0.74	0.68	0.88	0.78	0.99	3.93	4.28	3.72	3.59	4.00	4.04	3.88
Mo	0.24	0.21	0.32	0.28	0.25	0.33	0.43	0.34	0.69	0.70	0.93	0.63	0.56	0.72	0.59

续表 2  
Continued Table 2

样号	玄武岩										英安岩				
	Yms38	Yms39	Yms40	Yms41	Yms42	Yms43	Yms44	Yms45	Yms98	Yms100	Yms101	Yms102	Yms103	Yms104	Yms105
Ba	72.80	36.10	63.90	29.60	31.00	79.10	21.60	89.00	51.60	52.40	14.00	42.20	45.80	35.10	41.90
Hf	0.77	0.69	0.62	0.73	0.77	0.81	0.88	1.16	3.46	4.22	3.44	3.48	3.54	3.66	3.71
Ta	0.09	0.11	0.08	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.27	0.27	0.27	0.22	0.24	0.24	0.27
Pb	17.00	12.70	14.50	7.80	15.30	10.60	12.80	8.99	7.38	10.60	10.00	7.51	8.74	8.85	9.48
Th	0.19	0.12	0.13	0.23	0.11	0.33	0.16	0.33	2.64	2.61	2.32	2.27	2.43	2.53	2.42
U	0.12	0.09	0.11	0.10	0.11	0.35	0.29	0.29	0.94	1.05	0.87	0.90	0.98	1.07	0.96
La	2.88	1.68	1.51	6.67	3.21	2.50	2.23	2.80	10.80	12.10	10.70	9.53	10.30	11.00	10.50
Ce	7.22	5.14	4.46	12.40	7.17	6.30	6.29	8.00	27.70	30.70	27.10	24.50	26.80	28.40	27.20
Pr	1.15	0.83	0.77	1.60	1.07	1.06	1.11	1.37	4.03	4.47	3.97	3.58	3.91	4.02	3.93
Nd	5.71	4.28	3.92	6.77	5.66	5.54	5.31	6.65	18.80	20.80	18.40	16.40	18.40	18.80	18.50
Sm	1.66	1.40	1.35	1.61	1.68	1.75	1.67	2.13	5.27	5.58	5.28	4.61	5.23	5.14	5.00
Eu	0.80	0.56	0.68	0.78	0.66	0.63	0.71	0.84	1.53	1.78	1.54	1.47	1.60	1.63	1.56
Gd	2.07	1.76	1.55	1.96	2.02	2.07	2.01	2.76	6.19	6.44	6.15	5.68	6.24	6.50	5.99
Tb	0.39	0.32	0.31	0.44	0.36	0.43	0.40	0.50	1.18	1.21	1.17	1.09	1.13	1.16	1.12
Dy	2.16	2.01	1.89	2.23	2.10	2.67	2.57	2.88	6.46	7.31	6.69	6.13	6.84	6.80	6.67
Ho	0.46	0.39	0.38	0.50	0.43	0.54	0.50	0.60	1.43	1.50	1.43	1.27	1.38	1.41	1.38
Er	1.43	1.28	1.20	1.46	1.31	1.75	1.62	1.96	4.49	4.91	4.56	4.14	4.48	4.62	4.45
Tm	0.17	0.17	0.16	0.21	0.17	0.25	0.20	0.23	0.63	0.60	0.59	0.57	0.58	0.61	0.57
Yb	1.18	1.09	0.99	1.28	1.12	1.61	1.33	1.70	4.06	4.38	3.99	3.66	3.97	4.12	3.92
Lu	0.18	0.16	0.14	0.21	0.18	0.26	0.23	0.27	0.62	0.67	0.63	0.57	0.63	0.65	0.60
ΣREE	27.46	21.07	19.31	38.12	27.14	27.36	26.18	32.69	93.19	102.45	92.20	83.20	91.49	94.86	91.39
LREE/HREE	2.42	1.93	1.92	3.60	2.53	1.86	1.95	2.00	2.72	2.79	2.66	2.60	2.62	2.67	2.70
(La/Yb) <sub>N</sub>	1.75	1.11	1.09	3.74	2.06	1.11	1.20	1.18	1.91	1.98	1.92	1.87	1.86	1.92	1.92
δEu	1.32	1.09	1.44	1.34	1.10	1.01	1.18	1.06	0.82	0.91	0.83	0.88	0.86	0.86	0.87

注:  $A/NK = Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$ ;  $A/CNK = Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ ;  $^{17}Fe_2O_3$  为全铁;  $Fe^\# = ^{17}FeO/(^{17}FeO + MgO)$ ; 标准化数据据 Sun and McDonough(1989); 空白处未测。



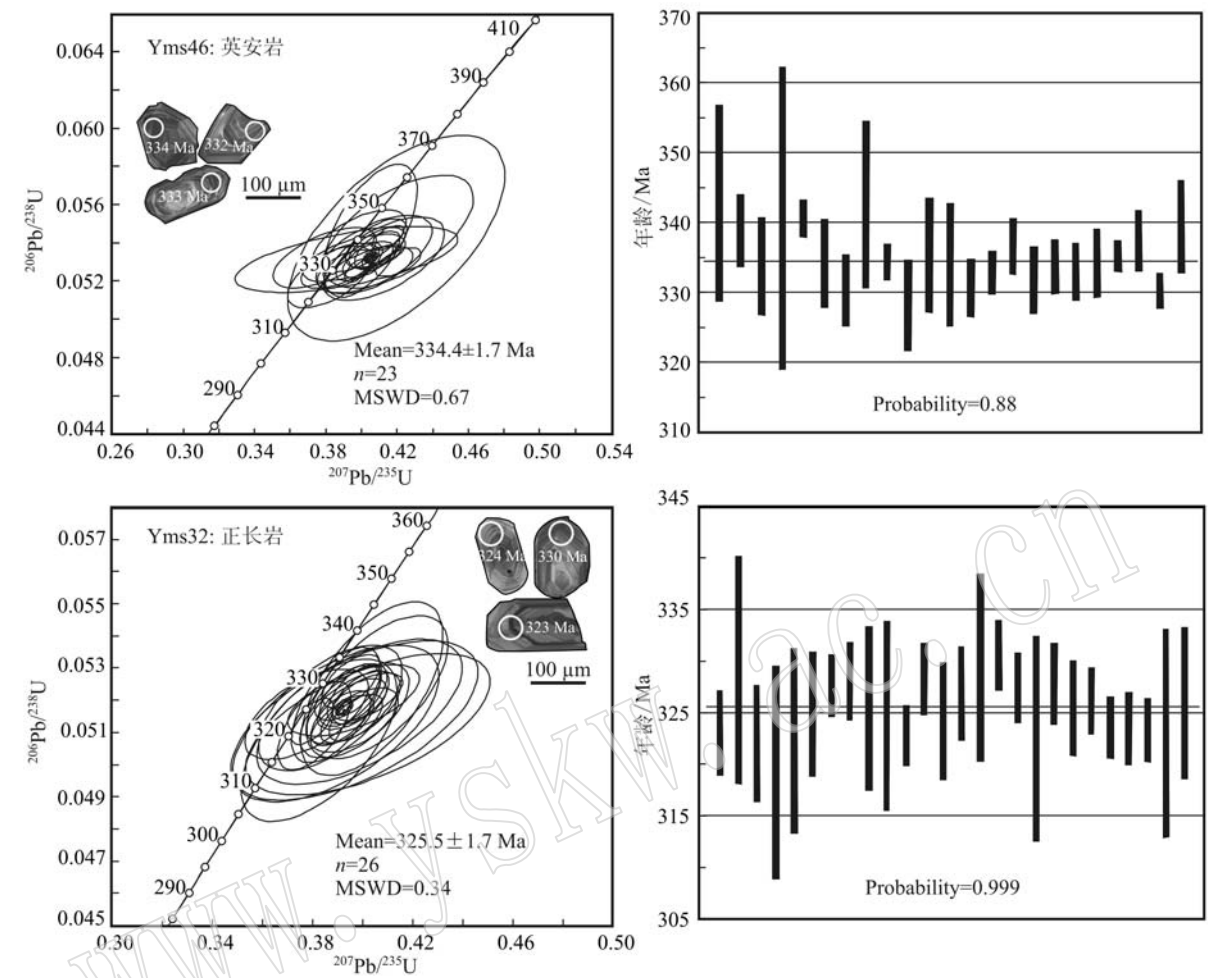


图 5 雅满苏铁矿区英安岩和正长岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄协和图

Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of the dacite and syenite in the Yamansu Fe ore district

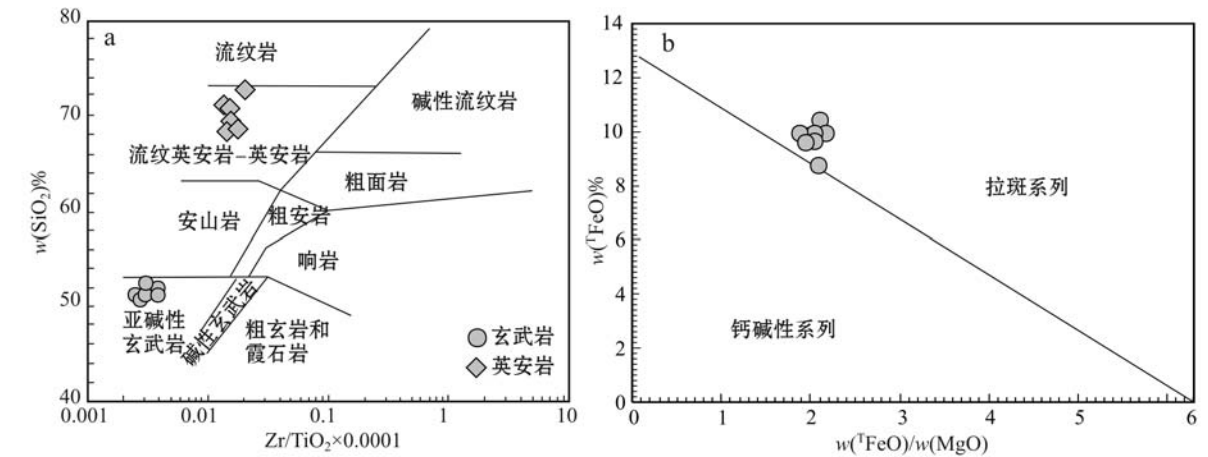


图 6 雅满苏铁矿区火山岩  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$  分类图(a, 据 Winchester and Floyd, 1977)和  $\text{TFeO}$  -  $\text{TFeO}/\text{MgO}$  图(b, 据 Miyashiro, 1974)

Fig. 6  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  (a, after Winchester and Floyd, 1977) and  $\text{TFeO}$  -  $\text{TFeO}/\text{MgO}$  (b, after Miyashiro, 1974) diagram of the volcanic rocks from the Yamansu Formation in the Yamansu Fe ore district



(5.24%~8.79%)含量,相对低的  $\text{TiO}_2$  (0.73%~0.84%)、全碱(5.06%~7.44%)和  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.04%~0.09%)含量,相对富 Na( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=6\sim 56$ ),  $\text{Mg}^\#$  介于 0.47~0.52 之间,属拉斑玄武系列岩石(图 6b)。英安岩具中等  $\text{SiO}_2$  含量(64.02%~67.40%);低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (11.29%~11.97%)、 $\text{TiO}_2$  (0.74%~0.84%)和  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.24%~0.30%)含量;中等的全碱(3.21%~4.70%)含量,且明显富钠( $\text{Na}_2\text{O}$  含量 $>\text{K}_2\text{O}$  含量),Fe 含量高, $^{\text{T}}\text{FeO}/(^{\text{T}}\text{FeO}+\text{MgO})$ 变化于 0.79~0.91。

在微量元素原始地幔标准化图解上,玄武岩显示较为一致的分布模式(图 7a),具有 Nb、Ta、Th、Zr 和 Hf 负异常, Ba、U、K、Sr、Ti 正异常;英安岩显示 Th、U、K、Sr 明显正异常, Nb、Ta、P 和 Ti 较相邻元素显示负异常(图 7b)。玄武岩的稀土元素总量( $\sum\text{REE}$ )较低( $19.31\times 10^{-6}\sim 38.12\times 10^{-6}$ ),  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  介于 1.09~3.74 之间,球粒陨石标准化图解显示轻稀土略微富集,  $\text{Eu}$  略显正异常( $\delta\text{Eu}=1.01\sim 1.44$ )(图 7c);英安岩的稀土元素总量( $\sum\text{REE}$ )变化较大( $83.20\times 10^{-6}\sim 102.45\times 10^{-6}$ ),  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  介

于 1.86~3.47 之间,球粒陨石标准化图解呈现平缓的轻稀土富集的右倾型,  $\text{Eu}$  异常不明显( $\delta\text{Eu}=0.82\sim 0.91$ )(图 7d)。

## 5 锆石 Hf 同位素组成

本文对雅满苏矿区英安岩(Yms46)和正长岩(Yms32)开展了系统的 Lu-Hf 同位素分析。分析工作在天津地质矿产研究所进行,所用仪器为 Finnigan Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光束斑直径为 25  $\mu\text{m}$ ,所用的激光脉冲频率为 10 Hz,能量密度约为 2.5  $\text{J}/\text{cm}^2$ ,以 He 为剥蚀物质载气。测定时用锆石国际标样 91500 作外标。原位 Hf 同位素比值测定在原 U-Pb 年龄分析位置或附近进行,结果及根据年龄计算的有关参数列于表 3。

可以看出,大部分样品的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值小于 0.002 5 (英安岩介于 0.000 8~0.001 0, 正长岩介于 0.001 3~0.002 0),表明锆石在形成以后有较少的放

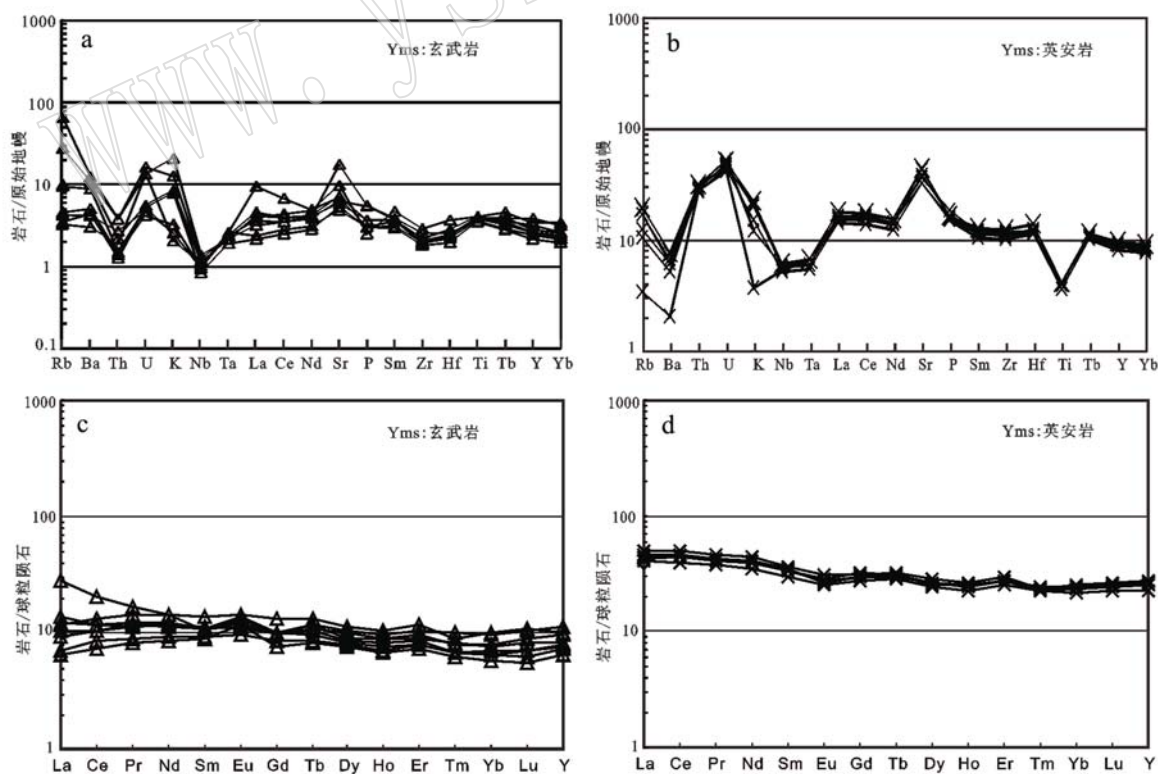


图 7 雅满苏铁矿区火山岩微量(a, b)及稀土元素标准化图解(c, d)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Plots of primitive mantle-normalized trace elements patterns (a, b) and chondrite-normalized REE patterns (c, d) of the volcanic rocks from the Yamansu Fe ore district (after Sun and McDonough, 1989)

表 3 雅满苏铁矿区英安岩和正长岩锆石 Lu-Hf 同位素组成  
Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic composition of the dacite from the upper part of Yamansu Formation in the Yamansu Fe ore district

测点	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	年龄/Ma	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(\tau)$	$t_{\text{DM}}$	$t_{\text{DM2}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
Yms46													
1	0.040 179	0.000 214	0.001 006	0.000 001	0.2826 50	0.000 017	342.8	0.282 644	-4.3	3.0	852	1 156	-0.97
2	0.044 467	0.000 174	0.001 264	0.000 001	0.282 737	0.000 017	338.7	0.282 729	-1.2	5.9	734	967	-0.96
3	0.041 087	0.000 129	0.001 079	0.000 001	0.282 669	0.000 018	333.6	0.282 663	-3.6	3.5	827	1 121	-0.97
4	0.053 081	0.000 191	0.001 408	0.000 001	0.282 708	0.000 020	340.5	0.282 699	-2.3	4.9	779	1 034	-0.96
6	0.100 769	0.001 026	0.002 522	0.000 001	0.282 802	0.000 018	340.5	0.282 786	1.1	8.0	664	837	-0.92
7	0.061 708	0.000 262	0.001 662	0.000 001	0.282 768	0.000 017	334.1	0.282 758	-0.1	6.9	698	905	-0.95
8	0.042 911	0.000 0235	0.001 147	0.000 001	0.282 733	0.000 015	330.2	0.282 726	-1.4	5.6	739	980	-0.97
9	0.067 000	0.000 423	0.001 783	0.000 001	0.282 754	0.000 017	342.5	0.282 742	-0.6	6.5	721	935	-0.95
11	0.050 930	0.000 108	0.001 374	0.000 001	0.282 717	0.000 014	334.3	0.282 708	-1.9	5.1	765	1 016	-0.96
12	0.068 422	0.000 460	0.001 784	0.000 001	0.282 733	0.000 017	328.0	0.282 722	-1.4	5.5	751	989	-0.95
15	0.057 849	0.000 289	0.001 535	0.000 001	0.282 665	0.000 019	333.8	0.282 655	-3.8	3.2	844	1 137	-0.95
17	0.040 597	0.000 243	0.001 129	0.000 001	0.282 734	0.000 014	330.5	0.282 727	-1.3	5.7	736	977	-0.97
18	0.098 668	0.000 208	0.002 626	0.000 001	0.282 798	0.000 016	332.7	0.282 781	0.9	7.7	673	853	-0.92
19	0.066 164	0.000 126	0.001 763	0.000 001	0.282 741	0.000 016	336.5	0.282 730	-1.1	5.9	739	966	-0.95
20	0.055 070	0.000 129	0.001 533	0.000 001	0.282 684	0.000 016	331.6	0.282 674	-3.1	3.8	816	1 096	-0.95
21	0.043 212	0.000 061	0.001 188	0.000 001	0.282 701	0.000 018	333.6	0.282 694	-2.5	4.6	784	1 051	-0.96
22	0.040 645	0.000 238	0.001 115	0.000 001	0.282 734	0.000 016	332.8	0.282 727	-1.3	5.7	736	975	-0.97
24	0.058 567	0.000 166	0.001 501	0.000 001	0.282 730	0.000 015	334.1	0.282 720	-1.5	5.5	750	990	-0.95
26	0.053 543	0.000 036	0.001 377	0.000 001	0.282 738	0.000 016	335.1	0.282 729	-1.2	5.9	736	970	-0.96
27	0.033 720	0.000 172	0.000 884	0.000 001	0.282 748	0.000 015	337.3	0.282 742	-0.8	6.4	712	938	-0.97
28	0.068 218	0.000 151	0.001 790	0.000 001	0.282 706	0.000 015	330.1	0.282 695	-2.3	4.5	790	1 050	-0.95
30	0.104 488	0.000 883	0.002 874	0.000 001	0.282 673	0.000 018	339.4	0.282 654	-3.5	3.3	864	1 135	-0.91
Yms32													
1	0.070 5	0.000 2	0.002 0	0.000 0	0.282 835	0.000 017	323.0	0.282 82	2.2	8.9	607	765	-0.94
4	0.045 6	0.000 2	0.001 3	0.000 0	0.282 812	0.000 016	329.0	0.282 80	1.4	8.4	628	804	-0.96
5	0.052 3	0.000 2	0.001 4	0.000 0	0.282 804	0.000 017	322.0	0.282 80	1.1	7.9	643	828	-0.96
6	0.040 2	0.000 1	0.001 2	0.000 0	0.282 733	0.000 014	319.2	0.282 73	-1.4	5.4	740	988	-0.96
7	0.055 2	0.000 2	0.001 6	0.000 0	0.282 799	0.000 016	322.2	0.282 79	0.9	7.7	653	842	-0.95
8	0.043 9	0.000 2	0.001 4	0.000 0	0.282 833	0.000 016	324.8	0.282 82	2.1	9.0	600	761	-0.96
9	0.054 9	0.000 3	0.001 5	0.000 0	0.282 829	0.000 016	327.5	0.282 82	2.0	8.9	607	768	-0.95
10	0.080 2	0.000 6	0.002 8	0.000 0	0.282 836	0.000 026	328.0	0.282 82	2.2	8.9	619	772	-0.92
11	0.137 2	0.002 0	0.004 5	0.000 1	0.282 918	0.000 038	325.3	0.282 89	5.2	11.4	522	610	-0.86
12	0.067 0	0.001 0	0.002 0	0.000 0	0.282 837	0.000 018	324.6	0.282 82	2.3	9.0	605	760	-0.94
13	0.063 6	0.000 3	0.001 8	0.000 0	0.282 835	0.000 019	322.7	0.282 82	2.2	8.9	604	763	-0.95

续表 3  
Continued Table 3

测点	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	年龄/Ma	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	$t_{\text{DM}}$	$t_{\text{DM2}}$	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
14	0.073 0	0.000 9	0.001 9	0.000 0	0.282 968	0.000 019	328.2	0.282 96	6.9	13.7	412	460	-0.94
15	0.062 0	0.000 6	0.001 9	0.000 0	0.282 843	0.000 021	324.1	0.282 83	2.5	9.2	595	746	-0.94
17	0.106 8	0.000 9	0.003 0	0.000 0	0.282 884	0.000 019	326.8	0.282 87	4.0	10.5	552	667	-0.91
18	0.057 4	0.000 2	0.001 7	0.000 0	0.282 891	0.000 018	329.2	0.282 88	4.2	11.1	521	631	-0.95
19	0.042 6	0.000 5	0.001 2	0.000 0	0.282 923	0.000 019	330.4	0.282 92	5.4	12.4	468	549	-0.97
20	0.061 4	0.000 7	0.001 9	0.000 0	0.282 613	0.000 018	327.3	0.282 60	-5.6	1.2	926	1261	-0.94
21	0.050 2	0.000 7	0.001 6	0.000 0	0.282 777	0.000 024	322.4	0.282 77	0.2	6.9	684	891	-0.95
22	0.053 1	0.000 5	0.001 8	0.000 0	0.282 801	0.000 021	327.7	0.282 79	1.0	7.8	653	837	-0.95
23	0.059 3	0.000 4	0.001 7	0.000 0	0.282 871	0.000 016	325.3	0.282 86	3.5	10.3	550	679	-0.95
24	0.060 2	0.000 9	0.001 6	0.000 0	0.282 824	0.000 017	326.0	0.282 81	1.9	8.7	616	782	-0.95
25	0.058 6	0.000 5	0.001 9	0.000 0	0.282 880	0.000 025	323.5	0.282 87	3.8	10.5	540	661	-0.94
26	0.060 2	0.000 3	0.001 4	0.000 0	0.282 811	0.000 020	323.4	0.282 80	1.4	8.2	632	812	-0.96
27	0.091 1	0.001 0	0.002 9	0.000 1	0.282 838	0.000 033	323.2	0.282 82	2.3	8.8	619	772	-0.91
28	0.060 5	0.000 6	0.002 0	0.000 0	0.282 895	0.000 028	322.9	0.282 88	4.4	11.0	520	629	-0.94
29	0.052 5	0.000 1	0.001 2	0.000 0	0.282 885	0.000 014	325.9	0.282 88	4.0	10.9	523	639	-0.96

注： $\epsilon\text{Hf}(t) = 10\,000 \times [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1$ ； $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln \{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$ ； $f_{\text{Lu}/\text{Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} - 1$ ； $t_{\text{DM}}^{\text{S}} = t + 1/\lambda \times \ln \{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$ ； $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$  (Soderlund *et al.*, 2004)； $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 、 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$  为样品的测定值； $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$  和  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772$  (Blichert-Toft and Albarède, 1997)； $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$ ， $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$  (Griffin *et al.*, 2002)； $t$  = 锆石的结晶年龄。

射成因 Hf 的累积(杨进辉等, 2006), 获得的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值能够代表其形成时体系的 Hf 同位素组成(吴福元等, 2007)。两个样品的  $\epsilon\text{Hf}(t)$  值均为很高的正值(英安岩的为  $+3.0 \sim +8.0$ , 正长岩为  $+6.9 \sim +13.7$ ), 显示了显著亏损的 Hf 同位素组成。所有锆石的  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$  (分别为  $-0.97 \sim -0.91$  和

$-0.97 \sim -0.86$ ) 明显小于镁铁质地壳的  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$  ( $-0.34$ ) 和硅铝质地壳的  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$  ( $-0.72$ ) (Vervoort *et al.*, 1996), 因此其二阶段模式年龄( $t_{\text{DM}2}$ ) (分别为  $837 \sim 1\,156$  Ma 和  $460 \sim 988$  Ma) 代表了源岩脱离亏损地幔的时间, 暗示了岩浆源区为新生地壳(图 8)。

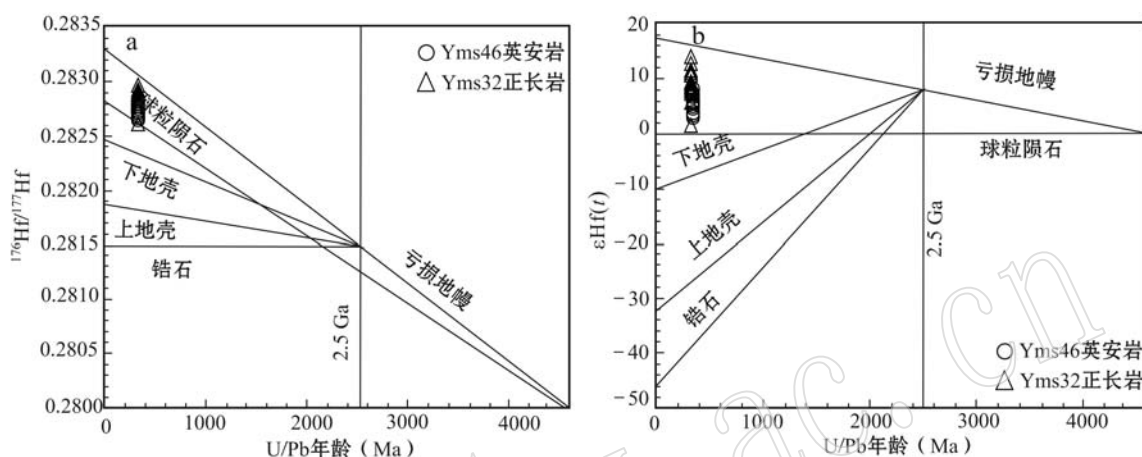


图 8 雅满苏铁矿区英安岩和正长岩中锆石单阶段模式年龄计算示意图(a)及与年龄相关图(b)[据唐冬梅等(2009)修改]

Fig. 8 Single-stage Hf model age calculation (a) and correlated diagram of zircon  $\epsilon\text{Hf}$  versus U-Pb (b) age of the dacite and syenite in the Yamansu Fe ore district(modified after Tang Dongmei *et al.*, 2009)

## 6 讨论

### 6.1 年代学意义

前人已利用化石定年法和同位素定年法等多种手段研究了雅满苏组及矿区岩石的形成时代。如新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一区域地质调查大队(2005a<sup>①</sup>, 2005b<sup>②</sup>)在雅满苏下亚组灰岩中发现有珊瑚[*Multithecopora* cf. *lerensteini* Vass(列氏多壁管珊瑚)、*Archanolasma* sp.(拟棚珊瑚)、*Auloclisia* sp.(管蛛网珊瑚)、*Diphyphyllum* sp.(双形珊瑚)、*Litophyllum* cf. *irregulare* wang(不规则石刺毛珊瑚)、*Clariphyllum* ? sp.(棒珊瑚)]和腕足类[*Kansuella* sp.(甘肃贝)、*Striatifera* sp.(细线贝)、*Plicatifera* sp.(轮褶贝)、*Dictyoclostus* sp.(网格长身贝)、*Schuchertella* sp.(舒克贝)、*Linoproductus* sp.(线纹长身贝)、*Bellerophon* sp.(神螺)、

*Neospirifer Liangchowensis* (凉州新石燕)、*Pustula* sp.(刺瘤贝)、*Spirifer* sp.(石燕)、*Eluctuaria* sp.(波形贝)、*Dictyoclostus* sp.(网格长身贝)、*Echinoconchus* sp.(轮刺贝)、粗卵石蛤和卵石蛤];在上亚组灰岩中发现有珊瑚[*Syringaxonoides* sp.(似轴管珊瑚?)、*Siphonodendron* sp.(丛管珊瑚)、*Paracaninia* sp.(拟犬齿珊瑚)、*Dibunophyllum* sp.(棚珊瑚)、*Siphonophyllia* sp.(管漏珊瑚)]及海百合茎[*Cyclocyclicus* sp.(圆圆茎, 未定种)、*Pentagonocyclicus* sp.(星圆茎)]等化石, 将雅满苏组定为早石炭世维宪期。罗婷等(2012)利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法获得雅满苏组东段、中段和西段火山岩谐和年龄分别为  $348 \pm 1.7$  Ma(MSWD=1.15)、 $335.9 \pm 2.4$  Ma(MSWD=1.03)和  $334 \pm 2.5$  Ma(MSWD=1.02), 并认为雅满苏组火山岩整体形成于早石炭世, 但东段形成时间早于西段。李厚民等(2014)利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法获得了雅满苏矿区切穿砂

① 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一区域地质调查大队. 2005a. 新疆鄯善县阿拉塔格北一带(K46E014006 幅, K46E014007 幅, K46E014008 幅)1:5 万区域地质矿产调查报告.

② 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第一区域地质调查大队. 2005b. 新疆哈密市夹白山一带(K46E013007 幅, K46E013008 幅, K46E013009 幅, K46E013010 幅)1:5 万区域地质矿产调查报告.

卡岩和铁矿体的辉绿岩脉的年龄为  $335 \pm 1.7$  Ma。Hou 等(2014a, 2014b) 获得了雅满苏铁矿中玄武岩和矽卡岩的锆石 U-Pb 年龄分别为  $324 \pm 1$  Ma 和  $323 \pm 1$  Ma。李华芹等(2003)获得了雅满苏铁矿区矿体围岩安山玢岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $374 \pm 44$  Ma, 石榴子石-绿帘石的 Sm-Nd 等时线年龄为  $352 \pm 46$  Ma。

本研究利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法, 获得了雅满苏铁矿区英安岩为  $334.4 \pm 1.7$  Ma, 切穿矿区矽卡岩及矿体的正长岩为  $325.5 \pm 1.7$  Ma (MSWD=0.34), 表明它们为早石炭世中晚期岩浆活动的产物, 这与前人获得的结果一致, 也与阿奇山-雅满苏构造带内广为出露的花岗质岩体[西凤山(349 Ma, 周涛发等, 2010)、长条山(315.7 Ma, 王碧香等, 1989; 337.4 Ma, 周涛发等, 2010)和红云滩岩体(328.5 Ma, 吴昌志等, 2006)、土屋-延东岩体(334~333 Ma, 秦克章, 2000)]形成时代一致。同时也说明雅满苏铁矿区矽卡岩形成于 325 Ma 之前。

## 6.2 构造环境

前人对东天山地区古生代时期阿齐山-雅满苏所处的构造环境一直存在多种不同的认识, 主要有: 石炭纪时期阿齐山-雅满苏一带是中天山地块的被动陆缘(李锦铁等, 2006)或发育于陆缘弧基础上的弧间盆地(罗婷等, 2012); 石炭纪时期为后碰撞构造演化阶段(王京彬等, 2006; 韩宝福等, 2006); 早石炭世中期康古尔洋向南北双向俯冲, 晚石炭世末洋壳俯冲作用减弱并且洋盆闭合(张雷, 2008); 晚石炭世进入后碰撞演化阶段(周涛发等, 2010); 晚石炭

世早期(320~310 Ma)发生碰撞, 晚石炭世晚期(310 Ma)为后碰撞伸展构造环境(张达玉, 2012)。这些争议的焦点在于这些岩浆岩的形成是否与天山古生代洋盆活动有关, 是形成于挤压体制还是伸展体制? 古亚洲洋闭合的时限, 是早石炭世还是晚石炭世?

雅满苏组是一套火山岩-正常沉积岩和含丰富化石的灰岩组合, 其中火山岩为基性-酸性火山岩及中酸性火山碎屑岩组成, 包括玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩、中酸性火山角砾岩和凝灰岩, 显示了活动大陆边缘环境岩石组合特征。所有玄武岩样品富集大离子亲石元素及轻稀土元素, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr 和 Hf, 显示了活动大陆边缘及洋内岛弧火山岩和受地壳混染的板内(大洋板内和大陆板内)岩石特征, 但是它们极低的  $\text{TiO}_2$  (<1.1%) 含量和低的亲石元素及轻稀土元素富集程度又与板内岩石特征有异; 东天山多为新增生的地壳物质, 岩石高的 MgO 和 FeO 含量说明即使有地壳物质混染也可以忽略。所有样品在 Th-Ta-Hf/3 图解中(图 9a)位于火山弧玄武岩区。英安岩的  $\text{Yb} < 5 \times 10^{-6}$  ( $3.66 \times 10^{-6} \sim 4.38 \times 10^{-6}$ ),  $\text{Ta} < 1 \times 10^{-6}$  ( $0.22 \times 10^{-6} \sim 0.27 \times 10^{-6}$ ),  $\text{Ta}/\text{Yb} < 0.5$  ( $0.06 \sim 0.07$ ),  $\text{Th} \gg \text{Ta}$ , 岩石的  $\text{A}/\text{CNK} < 1.1$  ( $0.49 \sim 0.61$ ), 以及明显的 Nb、Ta、Ti、P 负异常和 LREE、Th、U 正异常等与俯冲作用有关的陆缘弧岩浆作用特点(Condie, 1986)。所有岩石在 Ta-Yb 图上位于火山弧区(图 9b)。此外, 区域上出露有大量同时代的弧花岗岩体, 如红云滩岩体( $328 \pm 6$  Ma, 吴昌志等, 2006)、天目钾长花岗岩体( $320.2 \pm 3.1$  Ma, 周涛发等, 2010)和百灵山花

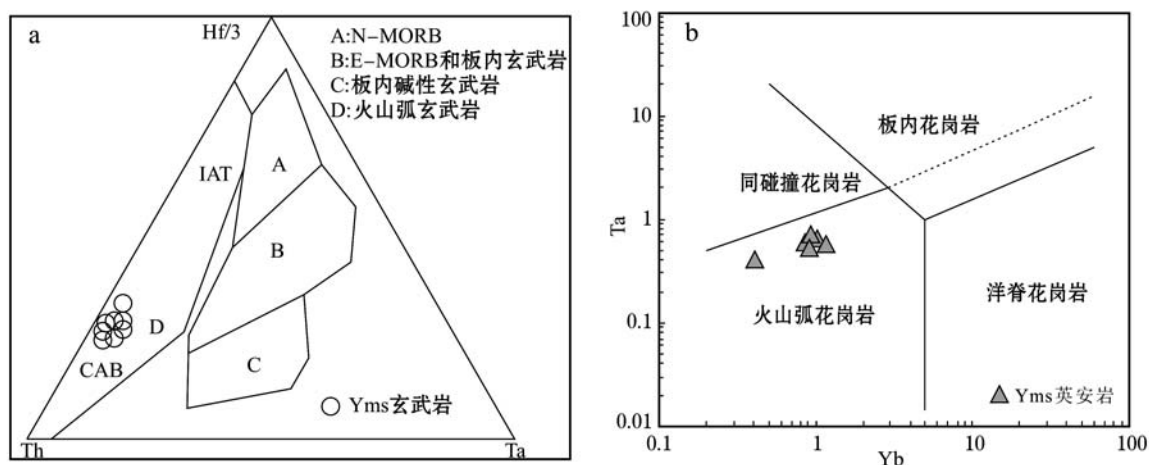


图 9 雅满苏铁矿区火山岩 Th-Ta-Hf/3(a)(底图据 Wood, 1980)和 Ta-Yb(b)图解

Fig. 9 Th-Ta-Hf/3(a) and Ta-Yb(b) diagrams for discriminating the tectonic setting of the volcanic rocks from the Yamansu Fe ore district

岗闪长岩体( $317.7 \pm 3.7$  Ma, 周涛发等, 2010)等。

总之, 雅满苏组火山岩具弧型岩浆岩组合特点, 并具有相应的地球化学组成, 这些特征表明雅满苏组是早石炭世中期活动大陆边缘环境的产物, 同时也说明石炭纪古亚洲洋尚未闭合。

### 6.3 岩浆来源及演化

活动大陆边缘岛弧环境岩浆源区可以是地幔楔中橄榄岩、俯冲带流体、俯冲板片熔体、幔源岩浆以及大陆地壳物质(包括洋底沉积物)(Macdonald *et al.*, 2000; 朱永峰等, 2005)。由于同位素在岩浆的演化过程中保持不变, 分配系数相等或相近的微量元素在岩浆演化过程中不易发生分离, 因此同位素和微量比值均可作为探讨岩石来源和演化的依据。

玄武岩的 Zr/Nb 比值( $28.76 \sim 33.61$ )和 Hf/Ta 比值( $6.27 \sim 12.89$ )远大于 OIB 的相应比值(5.8 和 2.9), 与 N-MORB 的相应比值(30 和 15.5)接近, 表明源区有类似 MORB 源的亏损地幔。岩石富集 U、Sr、Ba, 具有低的 Th( $< 1.02 \times 10^{-6}$ )含量、低的 Ce/Pb 比值( $0.3 \sim 0.9$ )和 Nb/U 比值( $2.51 \sim 7.56$ ), 说明受地壳物质混染不明显, 也表明了与俯冲作用有关的消减板片的流体对地幔交代作用对其源区成分有重要贡献(Seghedi *et al.*, 2004)。同时, 岩石富集 LREE 和 LILE, 亏损 Nb、Ta 以及低的 Nb/Ta( $6.73 \sim 11$ )和 Zr/Hf 比值( $28.1 \sim 36.05$ ), 暗示有受流体或熔体交代的地幔物质加入。然而, 它们具有高的 Ce/Th( $19.1 \sim 65.18$ )比值和 Ba/Th( $> 128$ )比值, 并且缺乏 Ce 的负异常, 表明源区没有俯冲沉积物熔体的加入(Plank and Langmuir, 1998); 低  $\text{TiO}_2$  和 Nb 含量, 表明没有俯冲板片熔体的加入。岩石具有高的 Sr 含量, Eu 异常不明显到明显的正异常, 低的 Y、Yb 和 LREE 含量和较为平缓的 MREE 和 HREE, 表明源区的深度较大, 为石榴石稳定区。岩石低的  $\text{Mg}^\#$ ( $0.47 \sim 0.52$ )和 Cr、Co、Ni 值以及它们之间的正相关性(图略), 表明母岩浆经历了橄榄石和尖晶石的分离结晶过程。

英安岩和正长岩具有高的  $\epsilon\text{Hf}(t)$  值和年轻的 Hf 模式年龄(表 3), 表明母岩浆来源于新生地壳物质的重熔。英安岩具有相对高的 Cr( $6.26 \times 10^{-6} \sim 9.28 \times 10^{-6}$ )及 Ni( $6.29 \times 10^{-6} \sim 8.36 \times 10^{-6}$ )的含量, 表明岩浆体系有少量的地幔物质混入。所有岩石具有不明显的 Eu 负异常和 Sr 正异常, 强烈亏损

Ba、Nb、Ta 和 Ti 等元素, HREE 分异不明显, Zr/Sm  $> 10$  以及高 Yb 含量, 表明源区矿物相中有角闪石和钛铁矿残留(Lightfoot *et al.*, 1987), 没有斜长石和石榴石的存在。岩石中见有碱性长石斑晶, 表明可能发生了弱的结晶分异作用。

综上所述, 雅满苏上亚组拉斑系列玄武岩的微量元素组成与 MORB 地幔及受流体交代的地幔楔熔体混合的岩浆特征相似, 并且岩浆在上升过程中几乎未受地壳物质混染; 英安岩是新生地壳部分熔融并混有幔源岩浆演化形成。它们为活动大陆边缘弧环境的产物, 是早于早石炭世时期古大洋俯冲消减过程中, 俯冲板片脱水产生的流体交代上覆地幔楔, 脱水洋壳密度增大引起板片断离, 导致软流圈地幔物质上涌, 并与受交代的地幔楔产生的熔体混合形成玄武质岩浆, 喷出地表形成玄武岩, 同时由于基性岩浆底侵作用, 使新生地壳部分熔融并经进一步演化喷出地表形成英安岩。结合前人研究成果, 在晚古生代, 阿奇山-雅满苏构造带内应存在多次基性岩浆底侵及诱发的壳幔岩浆混合作用。

### 6.4 对东天山地区赋存火山岩中的铁矿床成因启示

东天山地区是我国著名的铁矿产出区及最有潜力的铁矿找矿远景区之一, 目前已发现百余处铁矿床(点), 具有类型多样(包括沉积变质型、火山岩型、矽卡岩型、岩浆型和岩浆热液型、沉积型)(Zhang *et al.*, 2005; 陈毓川等, 2008; 董连慧等, 2009<sup>①</sup>, 2011, 2013; Zhang *et al.*, 2012, 2014; Hou *et al.*, 2014a, 2014b)、成矿时间较长、多期次、多成因及伴生铜、铅、锌、金、钼及锰等多种矿物组合特征。位于阿其克库都克断裂以北的阿齐山-雅满苏成矿带是东天山地区重要的铁多金属成矿带之一, 带内已知铁矿产地约 125 个, 主要成型矿床约有 38 个(中型 13 个、小型 25 个), 已控制的铁矿资源储量约 2.74 亿吨, 占新疆已控制铁矿资源储量的 17.34%(董连慧等, 2009<sup>①</sup>; 冯京等, 2009), 其中赋存于海相火山岩中的铁矿床占绝对优势(董连慧等, 2009<sup>①</sup>)。这些海相火山岩型铁多金属矿床沿阿奇克库都克断裂展布, 并多环绕带内存在的多个火山活动中心分布, 多个矿区内断裂构造及岩浆作用发育。它们主要赋存于下石炭统中期雅满苏组和下石炭统晚期-上石炭统早期土古土布拉克组火山-沉积岩系中, 矿体围

① 董连慧, 冯 京, 杨在峰, 等. 2009. 新疆东天山典型示范区铁矿成矿规律与矿产预测成果报告.

岩矽卡岩发育,也见有钠长石化和角岩化;矿体呈似层状、透镜状赋存于火山-沉积岩系和矽卡岩带中,受断裂控制。这些矿床的含矿层位及含矿岩性不同、蚀变矿物组合不同、金属矿物组合不同(单一铁矿床、铁铜多金属矿床、铁铜金多金属矿床)(柴凤梅等,2015<sup>①</sup>)。关于这些矿床的成因认识主要有矽卡岩型(包括岩浆热液有关的矽卡岩型(张立成等,2013)、层控矽卡岩型(张增杰等,2012)、接触交代矽卡岩型(王登红等,2006))、火山气液交代充填-矿浆贯入型(卢登蓉等,1995)、火山喷溢熔离型(张洪武等,2001)、接触变质火山沉积型(姜福芝等,2002)、火山气液交代-充填型(何英,2007)、火山喷溢沉积-热液加富火山岩型(陈毓川等,2008)等。

雅满苏铁矿床是东天山地区阿奇山-雅满苏成矿带内规模最大的铁矿床,矿体赋存于下石炭统雅满苏组中基性火山熔岩-火山碎屑岩夹碳酸盐岩及矽卡岩中,矿区内发育大量各类脉岩,缺乏花岗质岩石,矿床成因多有争议。本研究获得了赋矿地层火山岩的喷发年龄(334 Ma)和切穿矿区矽卡岩和矿体的正长岩脉年龄(325 Ma),它们与阿奇山-雅满苏带内早石炭世中晚期岩浆岩年龄一致。334 Ma 的火山岩年龄提供了成矿时代上限,325 Ma 的脉岩侵位年龄提供了成矿时代的下限,即铁成矿时代略晚 334 Ma 但早于 325 Ma,属早石炭世中期成矿,说明阿奇山-雅满苏成矿带内早石炭世中-晚期岩浆活动与铁矿床的形成有密切关系。

前已述及,阿奇山-雅满苏成矿带内石炭纪时期的岩浆岩是活动大陆边缘环境的产物。一般来说,该环境总体为挤压状态,但常伴有局部拉张或应力短期释放。前人研究成果表明,在俯冲碰撞挤压环境下,强烈的壳幔相互作用与热循环可以形成大量岩浆,局部的伸展为岩浆上升与侵位提供了动力和空间(Hitzman *et al.*, 1992; 毛景文等, 2008; Groves *et al.*, 2010; 张招崇等, 2016),俯冲环境中洋壳物质及幔源物质的加入,为铁的矿化提供了重要的物质基础。雅满苏组基性火山岩原生岩浆来源于俯冲物质、软流圈地幔和岩石圈地幔物质,原生岩浆含水 and Cl 等大量挥发分,在演化过程中经历了深部岩浆房充分的结晶分异过程,为岩浆中的挥发分

达到饱和继而出溶提供了必要条件,使金属元素和 Cl 等从熔体中分离(Hedequist and Richards, 1998; Simon *et al.*, 2004),这是由于挥发分的存在增加了 Fe 在岩浆中的溶解度,并且 Cl 在高温高压下是携带  $\text{Fe}^{3+}$  等金属离子的有效络合剂,可以与 Fe 形成络合物运移(张招崇等,2014)。此外,微量元素和稳定同位素资料显示,矿床中的 Fe、Cu 和 S 等成矿物质主要来源于岩浆体系(曾红等,2014a, 2014b),表明石炭纪时期的火山-侵入岩与成矿有密切的联系。

总之,活动大陆边缘环境及其伴随的构造岩浆事件,为东天山赋存于石炭纪火山-侵入岩中的铁矿床的形成创造了极为重要的动力条件,也为矿床的形成提供重要的成矿物质。

## 7 结论

(1) 雅满苏上亚组英安岩的成岩年龄为  $334.4 \pm 1.7$  Ma,切穿矿区矽卡岩及雅满苏组的正长岩为  $325.5 \pm 1.7$  Ma(MSWD=0.34),为早石炭世中晚期岩浆活动的产物,雅满苏铁矿床主成矿期早于 325 Ma。

(2) 雅满苏上亚组玄武岩母岩浆为亏损的软流圈地幔与受流体交代的地幔楔熔体的混合物,并经历了强烈的结晶分异过程;英安岩是新生地壳部分熔融并混有幔源岩浆演化形成。

(3) 阿奇山-雅满苏构造带在早石炭世晚期处于古亚洲洋俯冲的构造背景,是基性岩浆底侵及诱发的壳幔岩浆混合作用的产物;早石炭世中期古亚洲洋尚未闭合;赋存于石炭世火山岩中的铁矿床与该时期的岩浆活动具有密切的成因联系。

**致谢** 野外期间得到新疆地质矿产勘探开发局第六地质大队、宝钢集团八钢公司新疆钢铁雅满苏矿业有限责任公司相关工作人员的大力支持。样品的年龄测试得到了中国地质科学院矿产资源研究所侯可军老师、郭春丽老师的帮助。样品的主量元素、微量及稀土元素得到了国家地质测试中心实验室老师的大力支持,在此一并表示感谢。

① 柴凤梅,刘锋,张志欣,等. 2015. 东天山铁铜多金属矿床综合研究报告.



## References

- All China Commission of Stratigraphy. 2002. Table Specification for Regional Age Strata in China(Geological Time)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~72(in Chinese).
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1~2): 243~258.
- Chen Danling, Liu Liang, Che Zicheng, *et al.* 2001. Geochemical characteristics and tectonic implication of Carboniferous volcanites in the Luotogou area of Middle Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 378~384(in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan, Liu Dequan, Tang Yanlin, *et al.* 2008. Mineral Resources and Ore Forming System of Tianshan Mountains in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~580(in Chinese).
- Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of Early Proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United States[J]. *The Journal of Geology*, 94(6): 845~864.
- Dong Lianhui, Feng Jing, Zhuang Daoze, *et al.* 2011. Discussion 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).
- Dong Lianhui, Feng Jing and Liu Dequan. 2013. Metallogenic Regularity and Prediction Evaluation of Xinjiang Iron Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 50~55(in Chinese).
- Fang Weixuan, Gao Zhenquan, Jia Runxing, *et al.* 2006. Geological exploration potentials and geochemical study on rocks and ores in Shaquanzi copper and copper-iron deposits, east Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 413~1 424(in Chinese with English abstract).
- Feng Jing, Li Yongjun, Wang Xiaogang, *et al.* 2007. Redefinition of Carboniferous lithostratigraphic units in the Kumtag sand-edge area, East Tianshan, based on new fossil evidence[J]. *Geology in China*, 34(5): 942~949(in Chinese with English abstract).
- Feng Jing, Xu Shiqi, Tian Jiangtao, *et al.* 2009. Study on metallogenic regularity of marine volcanic-type iron ore of East Tianshan of Xinjiang and methods discuss[J]. *Xinjiang Geology*, 27(4): 330~336 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yimin, Zhu Baoqing, Yang Junlu, *et al.* 2002. Tectonics and evolution of the eastern Tianshan mountains-a brief introduction to tectonic map(1:500 000)of the eastern Tianshan Mountains of Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 20(4): 309~314(in Chinese with English abstract).
- Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, *et al.* 2004. A new Geological Time Scale with special reference to Precambrian and Neogene[J]. *Episodes*, 27(2): 83~100.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3~4): 237~269.
- Groves D I, Bierlein F P, Meinert L D, *et al.* 2010. Iron oxide copper-gold(IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits[J]. *Economic Geology*, 105(3): 641~654.
- Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, *et al.* 2001. Initiation and evolution of the Bogda subduction-torn-type rift [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 585~597(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China(Part I ) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 5: 1 077~1 086(in Chinese with English abstract).
- He Ying. 2007. Geology and geochemistry of Yamansu iron deposit Hami [J]. *West-china Exploration Engineering*, 11: 142~144 (in Chinese).
- Hedenquist J and Richards J. 1998. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 10: 235~256.
- Hitzman M W, Oreskes N and Einaudi M T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide(Cu-U-Au-REE) deposit[J]. *Precambrian Research*, 58(1~4): 241~287.
- Hou T, Zhang Z C, Piraino F, *et al.* 2014a. Geology, tectonic settings and iron ore metallogenesis associated with submarine volcanism in China: An review[J]. *Ore Geology Reviews*, (57): 498~517.
- Hou T, Zhang Z C, Santosh M, *et al.* 2014b. Geochronology and geochemistry of submarine volcanic rocks in the Yamansu iron deposit, East Tianshan Mountains, NW China: Constraints on the metallogenesis[J]. *Ore Geology Reviews*, (56): 487~502.
- Hou Guangshun, Tang Hongfeng and Liu Congqiang. 2007. Study on the mineralogy of volcanic of the Yamansu group in the Jueluotage tectonic belt, East Tianshan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(2): 189~194 (in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492(in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaowen, Qi Liang, Gao Jianfeng, *et al.* 2012. Geochemistry of volcanic rocks in the Dikan'er Formation of Jueluotage region, eastern Tianshan Mountains and its implications[J], *Acta Petrologica et Mineralogica Sinica*, 32(1): 1~12.

- erologica, 31(6): 799~817(in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaowen, Qi Liang, Wang Yichang, *et al.* 2013. Re-Os dating of magnetite from the Shaquanzi Fe-Cu deposit, eastern Tianshan, NW China[J]. Science China:Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-013-4660-z.
- Jiang Fuzhi, Qin Kezhang, Fang Tonghui, *et al.* 2002. Types, geological characteristics, metallogenic regularity and exploration target of iron deposits in eastern Tianshan Mountains[J]. Xinjiang Geology, 20(4): 379~383(in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Ding Jianhua, Li Lixing, *et al.* 2014. The genesis of the skarn and the genetic type of the Yamansu iron deposits, Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2477~2489(in Chinese with English abstract).
- Li Huaqin and Chen Fuwen. 2003. Rock-forming and Ore-forming Chronology of the Liuhuangshan Copper-Polymetallic deposit in East Tianshan Mountains[J]. Acta Geoscientia Sinica, 6: 555~558(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Wang Kezhuo, Sun Guihua, *et al.* 2006. Paleozoic active margin slices in the southern Turfan-Hami basin: geological records of subduction of the Paleo-Asian Ocean plate in central Asian regions[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1087~1102(in Chinese with English abstract).
- Li Wenming, Ren Bingchen, Yang Xingke, *et al.* 2002. The intermediate-acid intrusive magmatism and its geodynamic significance in Eastern Tianshan region[J]. Northwestern Geology, 35(4): 41~64(in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Liu Xiaoyu, Wang Xiaogang, *et al.* 2007. The discovery of conodonts fossils in Carboniferous of Kumukag area in the eastern Tianshan and its significance[J]. Xinjiang Geology, 25(2): 127~131(in Chinese with English abstract).
- Li Yuan, Yang Jingsui, Zhang Jian, *et al.* 2011. Tectonical significance of the Carboniferous volcanics in eastern Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(1): 193~209(in Chinese with English abstract).
- Lightfoot P C, Hawkesworth C J and Sethna S F. 1987. Petrogenesis of rhyolites and trachytes from the Deccan trap: Sr, Nd and Pb isotope and trace element evidence[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 95(1): 44~54.
- Lu Dengrong, Ji Jinsheng, Lü Rensheng, *et al.* 1995. Geochemical characteristics and genesis of the Yamansu iron ore deposit, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 16(1): 15~19(in Chinese).
- Luo Ting, Liao Qunan, Chen Jiping, *et al.* 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of the volcanic rocks from Yamansu Formation in the Eastern Tianshan, and Its Geological Significance[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 37(6): 1338~1352(in Chinese with English abstract).
- Ma Ruishi, Wang Ciyin and Ye Shangfu. 1993. Tectonic Framework and Crustal Evolution of the Eastern Tianshan Mountains[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1~225(in Chinese).
- Macdonald R, Hawkesworth C J and Heath E. 2000. The Lesser Antilles volcanic chain: a study in arc magmatism[J]. Earth Science Reviews, 49: 1~76.
- Mao Jingwen, Yu Jinjie, Yuan Dashun, *et al.* 2008. Iron oxide-copper-gold deposits: Characteristics, present research situation and ore prospecting[J]. Mineral Deposits, 27(3): 267~278(in Chinese with English abstract).
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins[J]. Am. J. Sci., 274: 321~355.
- Plank T and Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. Chemical Geology, 145(3~4): 325~394.
- Qin Kezhang. 2000. The Orogeny of Central Asia Type and Mineralization in North Xinjiang[M]. Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 1~194(in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Peng Xiaoming, San Jinzhu, *et al.* 2003. Types of major ore deposits, division of metallogenic belts in Eastern Tianshan, and discrimination of potential prospects of Cu, Au, Ni mineralization[J]. Xinjiang Geology, 21(2): 143~150(in Chinese with English abstract).
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 184(1): 123~138.
- Seghedi I, Downes H, Vaselli O, *et al.* 2004. Post-collisional Tertiary-Quaternary mafic alkalic magmatism in the Carpathian-Pannonian region: a review[J]. Tectonophysics, 393: 43~2.
- Simon A C, Pettke T, Candela P A, *et al.* 2004. Magnetite solubility and iron transport in magmatic-hydrothermal environments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68(23): 4905~4914.
- Soderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, *et al.* 2004. The  $^{176}\text{Lu}$  decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematic of Precambrian mafic intrusions[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 219: 311~324.
- Song Zhijie and Wei Shi'e. 1982. The early and middle Carboniferous volcanic rock series of Kumtag-Shaquanzi zone, Xinjiang[J]. Bull. Xi'an Inst. Geol. Min. Res., Chinese Acad. Geol. Sci., 76~93(in Chinese with English abstract).
- Su Benxun, Qin Kezhang, Sun He, *et al.* 2010. Geochronological, petrological, mineralogical and geochemical studies of the Xuanwoling mafic-ultramafic intrusion in Beishan area, Xinjiang[J]. Acta Petro-

- logica Sinica, 26(1): 3 283 ~ 3 294 (in Chinese with English abstract).
- Su Chunqian, Jiang Changyi, Xia Mingzhe, *et al.* 2009. Geochemistry and zircons SHRIMP U-Pb age of volcanic rocks of Aqishan Formation in the eastern area of north Tianshan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 901~915(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society London Special Publications, 42(1): 313~345.
- Tang Dongmei, Qin Kezhang, Sun He, *et al.* 2009. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu-Ni deposit: Constraints on source and genesis of mafic-ultramafic intrusions in eastern Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 817~831(in Chinese with English abstract).
- Vervoort J D, Pachelt P J, Gehrels G E, *et al.* 1996. Constraints on Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes[J]. Nature, 397(6 566): 624~627.
- Wang Bixiang, Li Zhaonai, Zhao Guangzan, *et al.* 1989. Geochemical characteristics of granitoids in the eastern sector of the Northern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, (3): 236~245 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Chunjie, Chen Zhenghui, *et al.* 2006. Metallogenic characteristic and direction in mineral serach in the East Tianshan, Xinjiang, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(8): 910~915 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingbin and Xu Xin. 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in Norhern Xinjiang, China[J]. Acta Geologica Sinica, 80: 23~31(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, *et al.* 2006. Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb-enriched basaltic rocks in the Northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crusal growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu-Au mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 11~30(in Chinese with English abstract).
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 20: 325~343.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. Earth and Planetary Science Letters, 50(1): 11~30.
- Wu Changzhi, Zhang Zunzhong, Zaw K, *et al.* 2006. Geochronology, geochemistry and tectonic significances of the Hongyuntan granitoids in the Qoltag area, Eastern Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1 121~1 134(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotope systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Zhang Guowei, Xia Zuchun, *et al.* 2002. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: Evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks[J]. Geological Bulletin of China, 1(2): 55~62(in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume[J]. Geological Bulletin of China, 23(9~10): 903~910(in Chinese with English abstract).
- Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Geology and Mineral Resources. 1993. Regional Geology of the Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing Press(in Chinese).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Shao Jian, *et al.* 2006. In-Situ U-Pb Dating and Hf Isotopic Analyses of Zircons from Volcanic Rocks of the Houcheng and Zhangjiakou Formations in the Zhang-Xuan Area, Northeast China[J]. Earth Science, 31(1): 71~80(in Chinese with English abstract).
- Zeng Hong, Chai Fengmei, Zhou Gang, *et al.* 2014a. Tracing of rare Earth element geochemistry of the Yamansu iron deposit in East Tianshan[J]. Xinjiang Geology, 32(4): 475~480(in Chinese with English abstract).
- Zeng Hong, Chai Fengmei, Zhou Gang, *et al.* 2014b. Mineralogy of skarn and magnetite of the Yamansu iron deposit and its geological significance[J]. Geology in China, 41(6): 1 914~1 928(in Chinese with English abstract).
- Zhang Dayu. 2012. Petrogenesis, Mineralization and Geodynamic evolution in Jueluotage area, Eastern Tianshan, Northwest China[D]. Hefei University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Zhang Dayu, Zhou Taofa, Yuan Feng, *et al.* 2010. Study on the type and spatial temporal distribution of the late Paleozoic deposits in the eastern Tianshan Mountains[J]. Mineral Deposits, S1: 28~29(in Chinese).
- Zhang Hongrui, Wei Gangfeng, Li Yongjun, *et al.* 2010. Carboniferous lithologic association and tectonic evolution of Dananhu arc in the East Tianshan Mountains[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(1): 1~14(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongwu and Xie Lixia. 2001. New views on origin of Yamansu iron deposit in Xinjiang autonomous region[J]. Changchun Inst. Tech(Nat. Sci. Edi.), 2(4): 26~29(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lichen, Wang Yitian, Chen Xuefeng, *et al.* 2013. Mineralogy, mineral chemistry and genesis of the Hongyuntan iron deposit in East

- Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(4): 431~449(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei. 2008. The analyses on the Carboniferous sedimentary basin in the Juluotage frame[D]. Supervised by: Prof. Su Chunqian. Shanxi: Changan University, master dissertation(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zengjie, Sun Jingbo, Hu Mingyue, *et al.* 2012. Study on stable isotopic characteristics of the Hongyuntan iron deposit of Eastern Tianshan and their implications for the process of mineralization[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(6): 918~924(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuoheng, Hong Wei, Jiang Zongsheng, *et al.* 2012. Geological Characteristics and Zircon U-Pb Dating of Volcanic Rocks from the Beizhan Iron Deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(3): 737~747.
- Zhang Z Z, Gu L X, Wu C Z, *et al.* 2005. Zircon SHRIMP dating for the Weiya pluton, eastern Tianshan: its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica(English edition)*, 79(4): 481~490.
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Li Houming, *et al.* 2014. Enrichment mechanism of iron in magmatic-hydrothermal system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1189~1204(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Santosh M, *et al.* 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 247~263.
- Zhang Zhaochong, Chai Fengmei and Xie Qihong. 2016. High-angle subduction in a thermal structure with warm mantle-cool crust: Formation of submarine volcanics-host iron deposits[J]. *Geology in China*, 43(2): 367~379(in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Yuan Feng, Zhang Dayu, *et al.* 2010. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 478~502(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing, *et al.* 2005. The Carboniferous volcano rock SHRIMP geochronology and geochemistry of trace elements, west Tianshan[J]. *Chinese science Bulletin*, 18: 78~88(in Chinese).
- 董连慧, 冯 京, 刘德权. 2013. 新疆铁矿床成矿规律及成矿预测评价[M]. 北京: 地质出版社, 50~55.
- 方维萱, 高珍权, 贾润幸, 等. 2006. 东疆沙泉子铜和铜铁矿床岩(矿)石地球化学研究与地质找矿前景[J]. *岩石学报*, 22(5): 1413~1424.
- 冯 京, 李永军, 王晓刚, 等. 2007. 东天山库姆塔格沙漠地区石炭纪化石新资料及地层厘定[J]. *中国地质*, 34(5): 942~949.
- 冯 京, 徐仕琪, 田江涛, 等. 2009. 东天山海相火山岩型铁矿成矿规律研究方法[J]. *新疆地质*, 27(4): 330~336.
- 冯益民, 朱宝清, 杨军录, 等. 2002. 东天山大地构造及演化-1:50万东天山大地构造图简要说明[J]. *新疆地质*, 20(4): 309~314.
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 2001. 论博格达俯冲断裂裂谷的形成与演化[J]. *岩石学报*, 17(4): 585~597.
- 韩宝福, 季建清, 宋 彪, 等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)-后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 5: 1077~1086.
- 何 英. 2007. 哈密雅满苏铁矿床地质地球化学特征[J]. *西部探矿工程*, 11: 142~144.
- 侯广顺, 唐红峰, 刘丛强. 2007. 东天山觉罗塔格构造带雅满苏组火山岩的矿物学研究[J]. *矿物学报*, 27(2): 189~194.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 28(4): 481~492.
- 黄小文, 漆 亮, 高剑峰, 等. 2012. 东天山觉罗塔格地区底坎儿组火山岩地球化学特征及构造环境探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(6): 799~817.
- 姜福芝, 秦克章, 方同辉, 等. 2002. 东天山铁矿床类型、地质特征成矿规律与找矿方向[J]. *新疆地质*, 20(4): 379~383.
- 李厚民, 丁建华, 李立兴, 等. 2014. 东天山雅满苏铁矿床夕卡岩成因及矿床成因类型[J]. *地质学报*, 88(12): 2477~2489.
- 李华芹, 陈富文. 2003. 东天山硫磺山铜多金属矿床成岩成矿作用同位素地质年代学[J]. *地球学报*, 6: 555~558.
- 李锦轶, 王克卓, 孙桂华, 等. 2006. 东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片: 中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录[J]. *岩石学报*, 22(5): 1087~1102.
- 李文明, 任秉琛, 杨兴科, 等. 2002. 东天山中酸性侵入岩浆作用及其地球动力学意义[J]. *西北地质*, 35(4): 41~64.
- 李永军, 刘晓宇, 王晓刚, 等. 2007. 东天山库姆塔格石炭纪牙形石的发现及地质意义[J]. *新疆地质*, 25(2): 127~131.
- 李 源, 杨经绥, 张 健, 等. 2011. 新疆东天山石炭纪火山岩及其构造意义[J]. *岩石学报*, 27(1): 193~209.
- 卢登蓉, 姬金生, 吕仁生, 等. 1995. 新疆雅满苏铁矿地球化学特征及矿床成因[J]. *西北地质*, 16(1): 15~19.

## 附中文参考文献

- 陈丹玲, 刘 良, 车自成, 等. 2001. 中天山骆驼沟火山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. *岩石学报*, 17(3): 378~384.
- 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 等. 2008. 中国天山矿产及成矿体系[M]. 北京: 地质出版社, 1~580.
- 董连慧, 冯 京, 庄道泽, 等. 2011. 新疆富铁矿成矿特征及主攻类

- 罗 婷, 廖群安, 陈继平, 等. 2012. 东天山雅满苏组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 37(6): 1 338~1 352.
- 马瑞士, 王赐银, 叶尚夫. 1993. 东天山构造格架及地壳演化[M]. 南京: 南京大学出版社, 1~225.
- 毛景文, 余金杰, 袁顺达, 等. 2008. 铁氧化物-铜-金 (IOCG) 型矿床: 基本特征、研究现状与找矿勘查[J]. 矿床地质, 27(3): 267~278.
- 秦克章. 2000. 新疆北部中亚型造山与成矿作用[M]. 北京: 中国科学院地质研究所, 1~194.
- 秦克章, 彭晓明, 三金柱, 等. 2003. 东天山主要矿床类型、成矿区带划分与成矿远景区优选[J]. 新疆地质, 21(2): 143~150.
- 全国地层委员会. 2002. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1~72.
- 宋治杰, 魏士娥. 1982. 新疆库姆塔格-沙泉子一带早-中石炭世的火山岩系[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所刊, (4): 76~93.
- 苏本勋, 秦克章, 孙 赫, 等. 2010. 新疆北山地区旋窝岭镁铁-超镁铁岩体的年代学、岩石矿物学和地球化学研究[J]. 岩石学报, 26(1): 3 283~3 294.
- 苏春乾, 姜常义, 夏明哲, 等. 2009. 北天山东段阿奇山组火山岩的地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 25(4): 901~915.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙 赫, 等. 2009. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征: 对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约[J]. 岩石学报, 25(4): 817~831.
- 王碧香, 李兆熊, 赵光赞, 等. 1989. 新疆北天山东段花岗岩类地球化学特征[J]. 地质学报, (3): 236~245.
- 王登红, 李纯杰, 陈郑辉, 等. 2006. 东天山成矿规律与找矿方向的初步研究[J]. 地质通报, 25(8): 910~915.
- 王京彬, 徐 新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J]. 地质学报, 80: 23~31.
- 王 强, 赵振华, 许继峰, 等. 2006. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义[J]. 岩石学报, 22(1): 11~30.
- 吴昌志, 张遵忠, Khin Zaw, 等. 2006. 东天山觉罗塔格红云滩花岗岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 22(5): 1 121~1 134.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等. 2002. 古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J]. 地质通报, 21(2): 55~62.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 23(9~10): 903~910.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 杨进辉, 吴福元, 邵济安, 等. 2006. 冀北张-宣地区后城组、张家口组火山岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素[J]. 地球科学, 31(1): 71~80.
- 曾 红, 柴凤梅, 周 刚, 等. 2014a. 东天山雅满苏铁矿床稀土元素地球化学示踪[J]. 新疆地质, 32(4): 475~480.
- 曾 红, 柴凤梅, 周 刚, 等. 2014b. 新疆雅满苏铁矿床矽卡岩和磁铁矿矿物学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 41(6): 1 914~1 928.
- 张达玉. 2012. 新疆东天山觉罗塔格地区成岩成矿作用及地球动力学过程[D]. 安徽: 合肥工业大学.
- 张达玉, 周涛发, 袁 峰, 等. 2010. 东天山觉罗塔格地区晚古生代矿床类型和时空分布规律研究[J]. 矿床地质, 31: 28~29.
- 张洪瑞, 魏刚锋, 李永军, 等. 2010. 东天山大南湖岛弧带石炭纪岩石地层与构造演化[J]. 岩石矿物学杂志, 29(1): 1~14.
- 张洪武, 谢丽霞. 2001. 对雅满苏铁矿床成因的新认识[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2(4): 26~29.
- 张立成, 王义天, 陈雪峰, 等. 2013. 东天山红云滩铁矿床矿物学、矿物化学特征及矿床成因探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 32(4): 431~449.
- 张 雷. 2008. 东天山觉罗塔格构造带石炭纪沉积盆地分析[D]. 长安大学.
- 张增杰, 孙敬博, 胡明月, 等. 2012. 东天山红云滩铁矿稳定同位素地质特征及其对成矿作用过程的指示[J]. 地球学报, 33(6): 918~924.
- 张招崇, 侯 通, 李厚民, 等. 2014. 岩浆-热液系统中铁的富集机制探讨[J]. 岩石学报, 30(5): 1 189~1 204.
- 张招崇, 柴凤梅, 谢秋红. 2016. 热幔-冷壳背景下的高角度俯冲: 海相火山岩型铁矿的形成[J]. 中国地质, 43(2): 367~379.
- 周涛发, 袁 峰, 张达玉, 等. 2010. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. 岩石学报, 26(2): 478~502.
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 等. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究[J]. 科学通报, 18: 78~88.