文章编号: 0254-5357(2012)05-0906-09

新疆阿尔泰托莫尔特铁(锰)矿成矿作用

杨富全[1], 郭旭吉[2], 黄承科[2], 刘 锋[1], 柴凤梅[3], 耿新霞[1], 张保江[4]
(1. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
2. 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 706 队, 新疆 阿勒泰 836500;
3. 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 830046;
4. 河北省地矿局第四水文工程地质大队, 河北 沧州 061000)

摘要: 新疆托莫尔特中型铁(锰)矿床赋存于上志留-下泥盆统康布铁堡组上亚组变质火山-沉积岩系中。本研究利用硫同位素和年代学,探讨该矿床的成矿物质来源、成矿时代和成矿作用。结果表明,矿床的形成经历火山沉积期、岩浆热液叠加改造期和区域变质期。火山沉积期为铁和锰主要成矿期,岩浆热液叠加改造期形成少量铁和铜矿化。火山沉积期黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 变化于 6.2‰~13.1‰和 -20‰,表明硫主要来自火山岩,也有少量来自细菌还原海水中的硫酸盐。岩浆热液叠加改造期硫化物的 $\delta^{34}S$ 变化于 -1.8‰~8.5‰,主要集中在 -1.8‰~3.8‰,表明硫主要来自黑云母花岗斑岩脉。含矿岩系变流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(406.7±4.3) Ma,穿切矿体的黑云母花岗斑岩脉锆石激光剥蚀-多接收器电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICPMS) U-Pb年龄为(401.6±0.6) Ma,表明托莫尔特铁矿火山沉积期形成的 Fe-Mn 矿化及岩浆热液叠加改造期形成的 Fe-Cu 矿化出现在早泥盆世(407~401 Ma),为火山喷发沉积和岩浆侵入活动的产物。

关键词: 铁矿床; 地质特征; 成矿作用; 托莫尔特; 阿尔泰
中图分类号: P618.31; P612 **文献标识码:** A

Metallogenesis of the Tuomoerte Fe-(Mn) Deposit in Altay, Xinjiang

YANG Fu-quan[1], *GUO Xu-ji*[2], *HUANG Cheng-ke*[2], *LIU Feng*[1], *CHAI Feng-mei*[3], *GENG Xin-xia*[1], *ZHANG Bao-jiang*[4]
(1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
2. No. 706 Geological Team, Xinjiang Nonferrous Geoexploration Bureau, Altay 836500, China;
3. Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
4. No. 4 Hydrogeological Party of the Hebei Bureau of Geology, Cangzhou 061000, China)

Abstract: The Tuomoerte medium type iron deposit can be found in the metavolcanic-sedimentary sequence of the upper Kangbutiebao Formation from the Upper Silurian to Lower Devonian. The source of ore materials, mineralogenetic epoch and metallogenesis were studied by S stable isotope and geochronology and are reported in this paper. Three periods of mineralization can be distinguished on the basis of field evidence and petrographic analyses: volcano-sedimentation, magmatic-hydrothermal, and regional metamorphism. The majority of the Fe-Mn metallogenic activity occurred during the volcano-sedimentation period, some Fe and the majority of Cu mineralization occurred during the magmatic-hydrothermal period. The $\delta^{34}S$ values of pyrite from the volcano-

收稿日期: 2012-02-22; **接受日期:** 2012-07-04
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAB07B02-01,2011BAB06B03-02); 国土资源部公益性行业专项经费项目(201211073)
作者简介: 杨富全,研究员,矿床学专业,从事矿床地质、地球化学研究。E-mail: fuquanyang@163.com。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

sedimentation period ranged from 6.2‰ to 13.1‰ and −20‰, indicating that the sulfur was mainly derived from the volcanic rocks, with some minor contributions from the bacteria-reduced sulphate in the seawater. The $\delta^{34}S$ values of pyrite from the magmatic-hydrothermal period ranged from −1.8‰ to 8.5‰ and cluster between −1.8‰ to 3.8‰, indicating that the sulfur was mainly derived from the biotite granite porphyry dyke. The zircon U-Pb age by Laser Ablation-Multicollector Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-MC-ICP-MS) of the meta-rhyolite of the Third Member of upper Kangbutiebao Fm is (406.7 ± 4.3) Ma, and the age of biotite granite porphyry dyke, which intrude into Fe orebody, is (401.6 ± 0.6) Ma. The zircon U-Pb ages indicate that the Fe-Mn mineralization period during the volcano-sedimentation and magmatic-hydrothermal periods coincides with early Devonian timing (401 − 407 Ma). The Fe-Mn and Fe-Cu mineralization were found to be related to volcanic eruption deposition and magma intrusion activities, respectively.

Key words: iron deposits; geological characteristics; metallogenesis; Tuomoerte; Altay

新疆阿尔泰南缘是中国重要的有色金属、稀有金属和白云母成矿带之一,其中铁矿在新疆具有重要地位。阿尔泰已发现 100 余处铁矿床(点),它们具有分布广、规模小、多期次、多成因和多种矿物组合的特征[1]。规模较大的铁矿床有蒙库大型铁矿、托莫尔特中型铁(锰)矿、乌吐布拉克中型铁矿、巴拉巴克布拉克中型铁矿等,蒙库铁矿、乌吐布拉克铁矿、阿巴宫铁-磷灰石矿、乔夏哈拉铁铜金矿、老山口铁矿铜金矿、萨尔布拉克铁矿和两棵树铁矿已有研究报道[2-14],其他矿床尚待开展系统的研究。托莫尔特中型铁(锰)矿床是新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 706 队于 2006 年在克兰盆地发现的最大铁矿床[15],也是典型的火山-沉积型铁矿。本文在详细的野外地质调查和大量岩芯观察基础上,对该矿床的地质特征、矿化特征、围岩蚀变、成矿期次进行了研究,利用硫同位素和年代学,探讨了成矿物质来源、成矿时代和成矿作用。

1　成矿地质背景

阿勒泰市托莫尔特铁(锰)矿(又称铁米尔特铁矿)位于克兰火山-沉积盆地,据阿勒泰市东直线距离 12 km,所处的大地构造位置为西伯利亚板块的南阿尔泰晚古生代活动陆缘[16]。新疆阿尔泰划分为北阿尔泰、中阿尔泰和南阿尔泰(图 1)。南阿尔泰北以阿巴宫断裂为界,南以克兹加尔断裂为界与额尔齐斯构造带相邻。主要由上志留统-下泥盆统康布铁堡组和中-上泥盆统阿勒泰镇组变质火山-沉积岩系组成,其次是石炭纪火山-沉积岩系和中-上志留统片岩、片麻岩、变粒岩。南阿尔泰变质火山-沉积岩系主要分布在 NW 向 4 个斜列的火山沉积盆地中,从 NW 至 SE 依次为阿舍勒盆地、冲乎尔盆地、克兰盆地和麦兹盆地,与火山作用有关的铜、铅、锌、铁、金矿主要分布在上述盆地中。

克兰盆地出露地层为中-上志留统库鲁木提群、上志留统-下泥盆统康布铁堡组和中-上泥盆统阿勒泰镇组。库鲁木提群主要为条带状混合岩、矽线黑云斜长片麻岩、十字石红柱石绿泥石二云母片岩夹变钙质砂岩、变质砂岩等。康布铁堡组下亚组主要岩性为(黑云、二云)石英片岩、千枚岩、变质流纹岩、变质英安斑岩、变质凝灰岩、变质(凝灰)火山角砾岩;上亚组为变质流纹岩、变质凝灰岩、变质熔结凝灰岩夹片麻岩、绿泥黑云片岩、大理岩薄层或透镜体。阿勒泰镇组为一套浅海相陆源碎屑岩,主要为变质砂岩、变质粉砂岩、变质钙质粉砂岩等,夹基性火山岩、火山碎屑岩、硅质岩和碳酸盐岩。

区域构造以阿勒泰复式向斜为主体,轴向 NW-SE,轴长约 50 km,轴面倾向 NE,倾角 50°~70°,NE 翼倒转,SW 翼正常。阿克巴斯套断裂、阿巴宫断裂和克因宫断裂为区域断裂,控制着泥盆系的分布。侵入岩以花岗岩为主,有阿巴宫-铁米尔特中晚奥陶世花岗岩(458~461 Ma)[17-18]、泥盆纪-石炭纪花岗岩、喇嘛昭中二叠世黑云母二长花岗岩(276 Ma)[19]、尚可兰晚三叠世碱长花岗岩(202 Ma)[20]和将军山晚侏罗纪花岗岩(150 Ma)[21]。

2　矿床地质特征

2.1　含矿岩系及侵入岩

矿区出露上志留-下泥盆统康布铁堡组,下亚组分布在矿区北东侧,下部为变质流纹质晶屑凝灰岩、变质流纹质熔岩,上部主要岩性有变质凝灰质粉砂岩、变质钙质砂岩夹薄层大理岩和变质流纹质晶屑凝灰岩。康布铁堡组上亚组分布在矿区中部(图 1),依据岩性组合可分为三个岩性段。第一岩性段主要为变质流纹质晶屑凝灰岩,局部见变质流纹质火山角砾岩。矿床赋存于第二岩性段中上部,容矿岩系为绿泥片岩、变质凝灰质砂岩、变质火山角

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

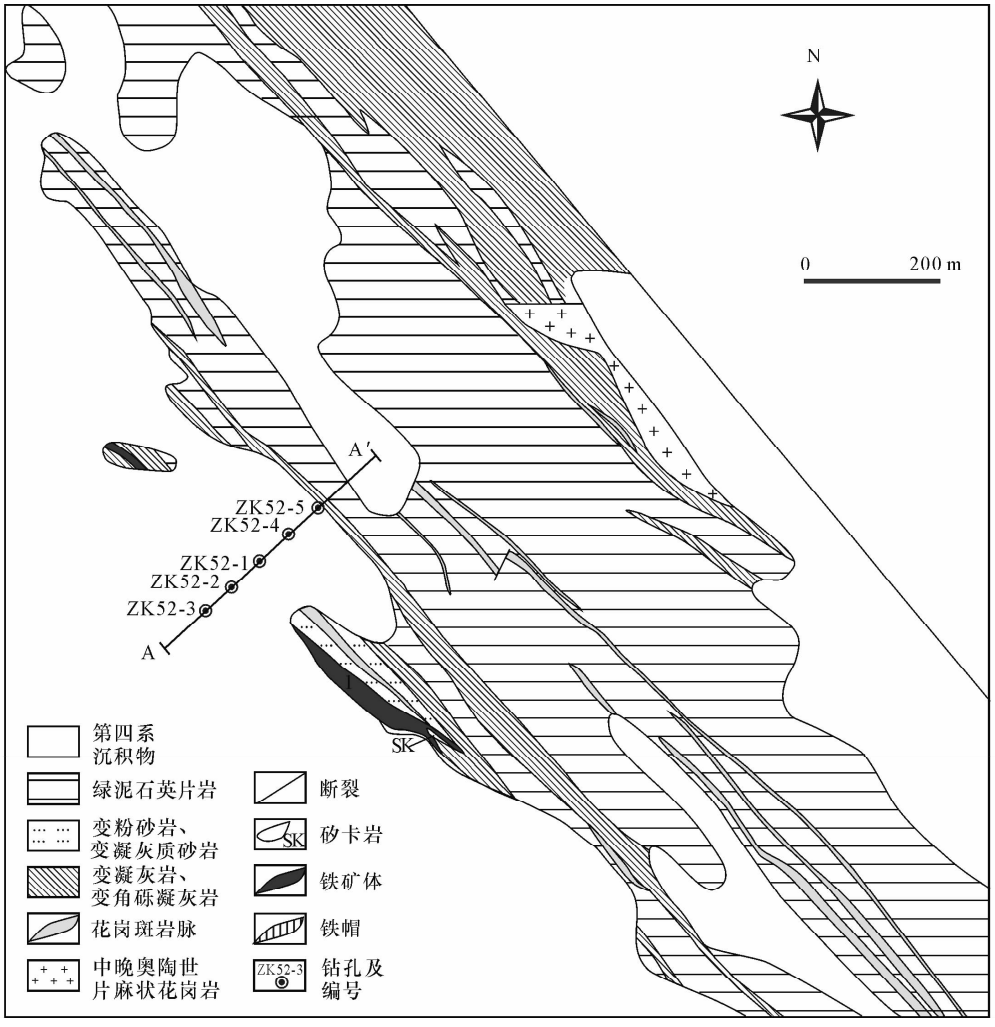


图 1　托莫尔特铁(锰)矿矿区地质略图[15]

Fig. 1　Simplified geological map of the Tuomoerte Fe-(Mn) deposit[15]

砾凝灰岩、变质英安质凝灰岩、变质钙质粉砂岩、大理岩等。第三岩性段为变质流纹质晶屑凝灰岩、变质流纹岩、变质流纹质火山角砾岩、变质流纹质集块角砾岩、变质沉晶屑凝灰岩、变质角砾凝灰岩等。

矿区东北部发育中晚奥陶世片麻状黑云母花岗岩,锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 459 Ma[17]。矿区发育黑云母花岗斑岩脉侵入到康布铁堡组第二岩性段中。另外发育少量斜长角闪岩(其原岩为辉绿玢岩等),脉体长一般在 20~50 m,宽几十厘米至 2 m。

2.2　矿体及矿石特征

托莫尔特铁(锰)矿化带总长约 1500 m,现已圈定出 3 个铁矿体,其中 2 号和 3 号矿体为隐伏矿体,矿体大致平行分布。1 号矿控制长 650 m,平均厚度 8.8 m,控制斜深 260 m;2 号矿控制长 550 m,平均厚度 15.0 m,控制斜深 540 m;3 号矿控制长 350 m,平均厚度 12.8 m,控制斜深 615 m。矿体顺层分布,呈似层状、透镜状、板状,沿走向和倾向均有分枝复合现象。

矿石类型为稠密浸染状铁矿石、块状铁矿石,少量条带状铁矿石。矿石构造以浸染状、块状为主,条带状、角砾状、细脉状、网脉状次之(图 2)。矿石结构有自形-它形粒状结构、交代溶蚀结构、包裹结构等。矿石中金属矿物主要有:磁铁矿、磁赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、软锰矿等。软锰矿与磁铁矿共生,呈细小颗粒分布于磁铁矿的颗粒间。非金属矿物主要有:方解石、石英、黑云母、绢云母、石榴石、阳起石、绿帘石、绿泥石等。

矿石中全铁品位变化于 22.3%~46.4%,平均品位为 31.3%~33.7%,Mn 平均 4.4%~7.6%。2 号铁矿体局部(如 48 线)伴生薄层铜矿体,Cu 平均品位为 0.21%~1.03%。

2.3　围岩蚀变及成矿期次划分

围岩蚀变主要为硅化、绢云母化、绿泥石化、石

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



图 2　托莫尔特铁(锰)矿围岩蚀变及矿石特征

Fig. 2　Characteristics of wall rock alteration and ores in the Tuomoerte Fe-(Mn) deposit

A—变质凝灰岩中绿帘石化、硅化、黄铁矿化; B—变质凝灰岩中石榴石化、绿泥石化、磁黄铁矿化; C—岩浆热液叠加改造期磁铁矿化黑云母花岗斑岩分布在铁矿体中; D—火山沉积期黄铁矿细脉状分布于阳起石磁铁矿中; E—火山沉积期条带状磁铁矿矿石; F—火山沉积期软锰矿呈团块状、脉状分布于变质凝灰岩中; G—岩浆热液叠加改造期磁铁矿呈细脉—网脉状分布于黑云母花岗斑岩中,发育硅化、黄铁矿、绿帘石化; H—岩浆热液叠加改造期磁铁矿呈细脉—浸染状分布于石榴石阳起石矽卡岩中; I—岩浆热液叠加改造期磁铁矿浸染状分布于大理岩中; J—岩浆热液叠加改造期黄铜矿细脉分布于石英脉中; K—火山沉积期块状阳起石磁铁矿矿石; L—浆热液叠加改造期网脉状阳起石磁铁矿矿石。

榴石化、阳起石化、透闪石化等。不同岩性中发育不同蚀变组合。

根据矿体特征、穿插关系、矿物共生组合、生成顺序及矿石组构等特征,将矿床的成矿过程划分为火山沉积期、岩浆热液叠加改造期和区域变质期。火山沉积期为主要成矿期,形成铁矿体,并伴生锰。岩浆热液叠加改造期主要是黑云母花岗斑岩脉穿插于铁矿体中,在岩脉中形成黄铁矿、磁铁矿。岩脉附近矿体围岩为灰岩时,常形成矽卡岩,伴有磁铁矿化。同时在围岩中形成含铜石英脉,或黄铜矿浸染状分布于变质粉砂岩和灰岩中。岩浆热液成矿期是铜矿主要成矿期。区域变质期主要表现为矿体与围岩一起变形,火山沉积期形成的铁矿物变质成磁铁矿,同时细粒矿物重结晶成粗粒矿物。

3　样品及分析方法

3.1　样品基本特征

1 件黑云母花岗斑岩脉测年样品采自 3 号矿体的 ZK52 -5(图 2C)。黑云母花岗斑岩呈块状构造,斑状结构,由斑晶和基质组成,斑晶占 35% ~40%,主要为条纹长石,其次为斜长石和石英。基质占 60% ~65%,主要为石英、钾长石和斜长石,少量黑云母,黄铁矿占 5%。

托莫尔特铁矿 18 件硫化物(2 件黄铜矿,16 件

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

黄铁矿)采自 3 号矿体的 ZK52 - 5 和 ZK60 - 4 钻孔岩芯。包括火山沉积期 11 件黄铁矿和岩浆热液改造期 7 件黄铁矿和黄铜矿样品。岩性为(石榴石)黄铁矿化变质凝灰岩、磁铁矿黄铁矿绿泥石化变质凝灰岩、黄铁矿化变质火山角砾岩、块状黄铁矿磁铁矿矿石、条带状黄铁矿磁铁矿矿石、黄铁矿磁铁矿化黑云母花岗斑岩和黄铜矿黄铁矿化变质粉砂岩。

3.2　锆石铀 - 铅同位素测年

锆石样品靶的制作和锆石阴极发光照相在北京离子探针中心完成。锆石 U - Pb 定年在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成,所用仪器为 Finnigan Neptune 型激光剥蚀 - 多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA - MC - ICPMS)及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。锆石定年激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm,频率为 10 Hz,能量密度约为 2.5 J/cm^2,以 He 为载气。信号较小的 ^{207}Pb、^{206}Pb、^{204}Pb(+^{204}Hg)和 ^{202}Hg 用离子计数器接收,^{208}Pb、^{232}Th、^{238}U 信号用法拉第杯接收,实现了所有目标同位素信号的同时接收,且不同质量数的峰基本上都是平坦的,进而可以获得高精度的数据,均匀锆石颗粒 ^{207}Pb/^{206}Pb、^{206}Pb/^{238}Pb、^{207}Pb/^{235}U 的测试精度(2σ)均为 2% 左右,对锆石标准的定年精度和准确度在 1%(2σ)左右。LA - MC - ICPMS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,锆石 U - Pb 定年以锆石 GJ - 1 为外标,U、Th 含量以锆石 M127(U 含量为 923 μg/g,Th 含量为 439 μg/g,Th/U 0.475)[22] 为外标进行校正。在测试过程中每测定 10 个样品点后,前后重复测定 3 个锆石标准样品(2 个 GJ - 1 和 1 个 Plešovice)进行校正。数据处理采用 ICPMS DataCal 程序,测试过程中绝大多数分析点的 ^{206}Pb/^{204}Pb > 1000,未进行普通铅校正,^{204}Pb 由离子计数器检测,^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通铅的影响。对 ^{204}Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除,锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序获得,表达式中所列单个数据点的误差均为 1σ,谐和年龄具 95% 的置信度。详细实验测试过程可参见文献[23]。

3.3　硫同位素分析

挑选新鲜纯净的黄铁矿和黄铜矿单矿物样品,纯度在 99% 以上。硫化物样品以 Cu_2O 作为氧化剂制样,释放的 SO_2 进行硫同位素分析。

同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室进行,同位素质谱计型号为 MAT 253EM。硫以 VCDT 为标准,测试精度为 ±0.2‰。

4　分析结果

4.1　锆石铀 - 铅测年结果

黑云母花岗斑岩中大部分锆石颗粒具有自形晶、半自形晶,呈长柱状和短柱状,长变化于 80 ~ 180 μm 之间,宽介于 40 ~ 100 μm。在阴极发光图像中,大部分锆石均发育岩浆锆石振荡环带结构,显示岩浆锆石的特点。锆石的 U、Th 含量变化较大(表 1),U 含量为 300 ~ 4356 μg/g,Th 含量为 95.9 ~ 4149.7 μg/g,Th/U 比值在 0.32 ~ 1.63 之间(大于 0.1),表明了锆石为岩浆成因[24]。

20 个锆石测点的年龄在误差范围内有较一致的 ^{207}Pb/^{206}Pb、^{207}Pb/^{235}U 和 ^{206}Pb/^{238}U 比值,在谐和图上基本集中分布(图 3),其 ^{206}Pb/^{238}U 年龄的加权平均值为(400.9 ± 1.3) Ma (MSWD = 0.12),与谐和年龄(401.6 ± 0.6) Ma (MSWD = 3.9) 一致,401 Ma可代表黑云母花岗斑岩脉的形成时代为早泥盆世。

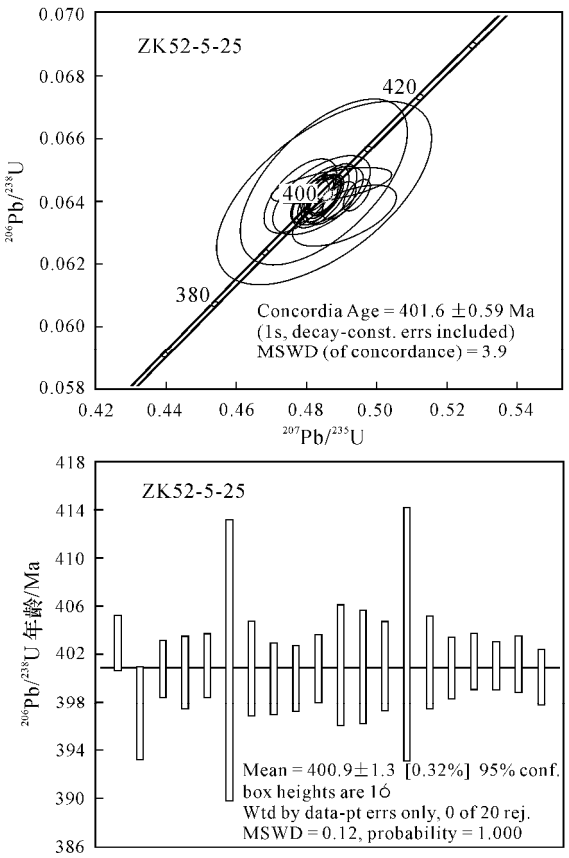


图 3　托莫尔特矿区黑云母花岗斑岩锆石 U - Pb 年龄及谐和图

Fig. 3　Zircon U-Pb age and concordia diagram of the biotite granite porphyry from the Tuomoerte ore district

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1　托莫尔特矿区黑云母花岗斑岩 LA－MC－ICPMS 锆石 U－Pb 年龄测定结果

Table 1　Analytical results of elements in zircon of biotite granite porphyry in the Tuomoerte ore district by LA-MC-ICPMS

点号	w_B/(μg·g^{-1})		Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$	
	^{232}Th	^{238}U		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ
ZK52-5-25-01	95.9	300.5	0.32	0.0548	0.0012	0.487	0.011	0.0645	0.0004	466.7	50	402.9	7.8	403	2.3
ZK52-5-25-03	1376.3	2930.1	0.47	0.0556	0.0005	0.491	0.01	0.0635	0.0006	438.9	20.4	405.5	6.7	397.1	3.9
ZK52-5-25-04	2215.7	3985.2	0.56	0.0549	0.0001	0.485	0.003	0.0641	0.0004	409.3	3.7	401.4	2.1	400.8	2.4
ZK52-5-25-06	2341	3444.9	0.68	0.0549	0.0001	0.484	0.004	0.0641	0.0005	405.6	-26.9	400.9	2.6	400.5	3.0
ZK52-5-25-07	1418.2	3710.7	0.38	0.055	0.0001	0.486	0.003	0.0642	0.0004	413	5.6	402	2.2	401.1	2.7
ZK52-5-25-08	1075.4	2445.9	0.44	0.0543	0.0003	0.485	0.02	0.0643	0.0019	388.9	13	401.5	13.8	401.5	11.7
ZK52-5-25-09	1442.7	3026	0.48	0.0548	0.0002	0.484	0.005	0.0641	0.0006	466.7	5.6	400.8	3.7	400.8	4.0
ZK52-5-25-10	1623.7	2972.2	0.55	0.0548	0.0001	0.483	0.004	0.064	0.0005	466.7	3.7	400.2	2.6	401	3.0
ZK52-5-25-11	1577.3	3130.7	0.50	0.0545	0.0001	0.481	0.004	0.064	0.0005	394.5	3.7	398.7	2.5	399.9	2.8
ZK52-5-25-12	1392.4	3733.1	0.37	0.0549	0.0001	0.485	0.004	0.0642	0.0005	405.6	-28.7	401.2	2.4	400.8	2.8
ZK52-5-25-13	1280.9	2736.1	0.47	0.0546	0.0004	0.484	0.009	0.0642	0.0008	394.5	10.2	401	6.3	401.1	5.0
ZK52-5-25-14	873.8	2356.2	0.37	0.0541	0.0002	0.478	0.007	0.0642	0.0008	372.3	9.3	396.8	4.7	400.9	4.7
ZK52-5-25-15	1259.9	3183	0.40	0.0549	0.0003	0.486	0.007	0.0642	0.0006	409.3	9.3	402.1	4.6	401	3.7
ZK52-5-25-16	1243.5	2765.3	0.45	0.0543	0.0002	0.485	0.016	0.0646	0.0017	383.4	9.3	401.4	10.7	403.6	10.6
ZK52-5-25-17	4149.7	2548.5	1.63	0.0551	0.0001	0.487	0.005	0.0642	0.0006	416.7	3.7	402.9	3.3	401.3	3.9
ZK52-5-25-18	2994.6	3598.9	0.83	0.055	0.0001	0.485	0.003	0.0642	0.0004	409.3	5.6	401.6	2.1	400.9	2.5
ZK52-5-25-19	1745.3	2763.5	0.63	0.0546	0.0001	0.483	0.003	0.0643	0.0004	394.5	3.7	400.1	2.2	401.4	2.3
ZK52-5-25-20	2835.4	4356.3	0.65	0.0559	0.0001	0.494	0.003	0.0642	0.0003	450	-1.0	407.8	1.7	401.1	2.0
ZK52-5-25-21	1498	3194.2	0.47	0.0549	0.0001	0.485	0.003	0.0642	0.0004	405.6	-28.7	401.7	2.1	401.2	2.4
ZK52-5-25-22	624.5	1745	0.36	0.0555	0.0001	0.489	0.003	0.0641	0.0004	431.5	3.7	404.4	2.2	400.1	2.4

4.2　硫同位素特征

18 件黄铁矿和黄铜矿的 $\delta^{34}S$ 变化较大(表 2),即有正值也有负值,变化于 -20‰～13.1‰,主要集中在 -2‰～1‰和 6‰～14‰(图 4)。11 件火山沉积期黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 变化于 6.2‰～13.1‰和 -20‰,峰值为 10.5‰。7 件岩浆热液叠加改造期样品(2 件为黄铜矿,5 件为黄铁矿)的 $\delta^{34}S$ 变化于 -1.8‰～8.5‰,主要集中在 -1.8‰～3.8‰。

表 2　托莫尔特铁(锰)矿硫化物硫同位素组成

Table 2　Sulfur isotope composition of sulphides from the Tuomoerte Fe-Mn deposit

序号	样品编号	矿物	$\delta^{34}S$/‰	序号	样品编号	矿物	$\delta^{34}S$/‰
1	ZK52-5-3	黄铁矿	9.9	10	ZK60-4-22	黄铁矿	6.2
2	ZK52-5-4	黄铁矿	10.4	11	ZK60-4-23	黄铁矿	13.1
3	ZK52-5-5	黄铁矿	9.3	12	ZK52-5-1-1	黄铁矿	0.3
4	ZK52-5-8	黄铁矿	8.7	13	ZK52-5-1-2	黄铜矿	-0.4
5	ZK52-5-33	黄铁矿	11.7	14	ZK52-5-2	黄铁矿	3.8
6	ZK52-5-37	黄铁矿	10.8	15	ZK52-5-7	黄铁矿	0.8
7	ZK52-5-38	黄铁矿	10.1	16	ZK52-5-35	黄铁矿	6.3
8	ZK52-5-42	黄铁矿	-20	17	ZK52-5-36	黄铁矿	8.5
9	ZK52-5-43	黄铁矿	11.1	18	ZK52-5-40	黄铜矿	-1.8

注: 序号 1～11 为火山沉积期,序号 12～18 为岩浆热液叠加改造期。

5　讨论

5.1　成矿时代

托莫尔特铁(锰)矿床赋存于晚志留－早泥盆世康布铁堡组上亚组第二岩性段中上部,容矿岩系为绿泥片岩、变质凝灰质砂岩、变质火山角砾凝灰岩、变质英安质凝灰岩、变质钙质粉砂岩、大理岩等;矿体顺层分布;矿石中发育块状构造和条带状构造;成矿元素是 Fe－Mn,软锰矿与磁铁矿共生,前者呈细小颗粒分布于磁铁矿的颗粒间;硫同位素中有生物成因硫(见下文讨论),这些特征表明托莫尔特铁(锰)矿为火山沉积成因。铁和锰的成矿时间与含矿火山岩系时间一致,本研究在矿区外围铁米尔特一带获得康布铁堡组上亚组第三岩性段的变质流纹岩锆石 SHRIMP U－Pb 年龄为(406.7 ± 4.3) Ma[25],这个年龄可大致代表成矿时间。

矿体中黑云母花岗斑岩脉 20 个锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值为(400.9 ± 1.3) Ma (MSWD = 0.12),与谐和年龄(401.6 ± 0.6) Ma (MSWD = 3.9)一致,401 Ma 可代表黑云母花岗斑岩脉的侵位时间。黑云母花岗斑岩脉中及附近伴有铜矿化和磁铁矿化,岩脉的侵位年龄也限定了岩浆热液叠加改造期铜和铁的成矿时代为 401 Ma。黑云母花岗斑岩脉分布于铁矿体中,明显晚于铁矿体的形成时代,岩脉的形成时代也限定铁矿体的形成时代早于 401 Ma。

由此可以认为,托莫尔特铁(锰)矿火山沉积期及岩浆热液叠加改造期形成时代十分接近,为 401～407 Ma,是早泥盆世火山喷发和岩浆侵入活动的产物。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

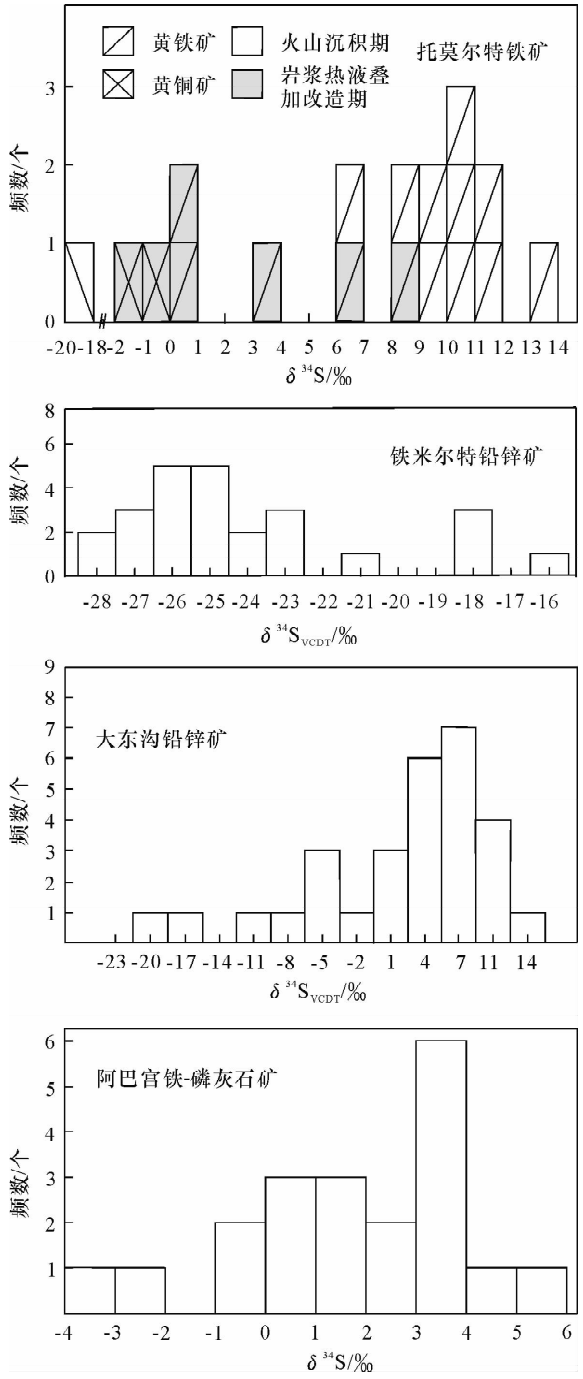


图 4　硫同位素直方图

Fig. 4　Histogram of sulfur isotope

铁米尔特铅锌矿据耿新霞等[27]，大东沟铅锌矿据刘敏等[28]，阿巴宫铁－磷灰石矿据杨富全等[1]。

5.2　成矿物质来源

托莫尔特铁(锰)矿火山沉积期和岩浆热液叠加改造期硫化物中硫同位素明显不同，前者明显有两种硫同位素来源，10 件黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 变化于 6.2‰～13.1‰，峰值为 10.5‰。研究认为中酸性火山岩的 $\delta^{34}S$ 一般为正值，这种正值的可能原因是海底火山活动时海水硫酸盐进入火山体系中，引起海底火山岩的 $\delta^{34}S$ 升高[26]。根据托莫尔特矿区容矿岩系为海相火山岩系，推断硫可能来自于从火山岩的淋滤。与托莫尔特铁(锰)矿相距 1 km 的铁米尔特铅锌多金属矿 25 件硫化物 $\delta^{34}S$ 主要变化于 －27.8‰～－16‰，峰值为 －25.5‰(图 6)，表明硫来自海水硫酸盐的有机还原作用[27]。托莫尔特火山沉积期 1 件样品的 $\delta^{34}S$ 值为 －20‰，落在铁米尔特矿 $\delta^{34}S$ 的变化范围内，表明在火山沉积期有少量硫具有生物成因硫的特征，硫来自细菌还原海水硫酸盐。托莫尔特铁(锰)矿火山沉积期硫主要来自火山岩，少量来自细菌还原海水硫酸盐，这种特征与同处克兰盆地的大东沟铅锌矿一致，大东沟铅锌矿 29 件硫化物 $\delta^{34}S$ 主要变化于 －22.3‰～11.7‰，峰值为 7‰，表明硫来自火山岩和海水[28]。

托莫尔特矿床岩浆热液叠加改造期 7 件硫化物 $\delta^{34}S$ 变化于 －1.8‰～8.5‰，主要集中在 －1.8‰～3.8‰，接近于 0‰，与幔源硫变化范围一致(－3‰～3‰)[29]，表明硫主要来自岩浆。该期硫同位素特征与同处克兰盆地的阿巴宫火山热液型铁－磷灰石矿床的硫同位素特征一致($\delta^{34}S$ 变化于 －4.3‰～5.2‰，峰值为 3.5‰)。

总之，火山沉积期硫主要来自围岩(火山岩、火山碎屑岩)，也有少量来自海水中的硫酸盐被细菌还原产出的硫，岩浆热液叠加改造期成矿的硫主要来自岩浆。

5.3　成矿作用探讨

在早中奥陶世(500～460 Ma)古亚洲洋板块向北俯冲到阿尔泰微大陆之下，形成 500 Ma 左右的火山岩。460～413 Ma 期间形成岛弧火山岩[30]和奥陶纪花岗岩(阿巴宫北－铁米尔特花岗岩，462～458 Ma)[17-18]。早于 413 Ma，由于板块的俯冲作用在克兰一带形成陆缘拉张断陷盆地，413～389 Ma[25]形成了康布铁堡组火山碎屑岩和正常沉积岩组合。伴随火山喷发沉积作用，在形成康布铁堡组上亚组中酸性－酸性(以酸性为主)火山碎屑岩的同时，在火山洼地局部形成铁锰质灰岩、含锰铁矿体(托莫尔特铁锰矿)，在火山喷发中心形成了 VMS 型铅锌多金属矿体(铁米尔特铅锌铜矿、大东沟铅锌矿)，在火山断裂中形成火山热液型(或矿浆型)铁－磷灰石矿床(如阿巴宫铁－磷灰石矿)。

在含锰铁矿体形成不久的 401 Ma 左右，伴随火山作用有潜火山岩脉侵入到火山岩系中。在铁矿体及围岩中有黑云母花岗斑岩脉侵入，局部与灰岩或

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

凝灰岩作用形成矽卡岩(石榴石、绿帘石、阳起石、绿泥石),伴有细脉状和浸染状磁铁矿化,并在矽卡岩附近的粉砂岩和凝灰岩中形成黄铜矿细脉、黄铜矿石英脉和黄铁矿化。同时黑云母花岗斑岩脉中形成细脉-浸染状磁铁矿、绿帘石化、绿泥石化、黄铁矿化和硅化。

阿尔泰在晚泥盆世最终洋盆闭合,早石炭世各块体拼合在一起,阿尔泰造山带主要的区域(韧性)变形变质作用发生于 350 Ma 之前[31],克兰盆地区域地层发生变形和变质作用,褶皱和逆冲断层发育。矿区地层和含锰铁矿体发生变形和中低压绿片岩相变质作用,原沉积作用形成的铁矿物变质成磁铁矿,沉积形成的一些矿物发生了重结晶作用。

6　结语

(1) 托莫尔特中型铁(锰)矿床位于新疆阿尔泰南缘的克兰盆地,矿床赋存于上志留-下泥盆统康布铁堡组中上亚组第二岩性段。矿床的形成经历火山沉积期、岩浆热液叠加改造期和区域变质期。火山沉积期为铁和锰的主要成矿期,岩浆热液叠加改造期主要是伴随黑云母花岗斑岩脉侵入形成少量铁和铜矿化。

(2) 11 件火山沉积期黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 变化于 6.2‰~13.1‰和 -20‰,峰值为 10.5‰,表明硫主要来自围岩(火山熔岩、火山碎屑岩),也有少量来自海水中的硫酸盐被细菌还原。7 件岩浆热液叠加改造期硫化物的 $\delta^{34}S$ 变化于 -1.8‰~8.5‰,主要集中在 -1.8‰~3.8‰,表明硫主要来自侵入矿体的黑云母花岗斑岩脉。

(3) 穿切矿体的黑云母花岗斑岩脉锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄的加权平均值为(400.9±1.3) Ma (MSWD=0.12),谐和年龄为(401.6±0.6) Ma (MSWD=3.9),含矿岩系变流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(406.7±4.3) Ma,表明托莫尔特铁(锰)矿火山沉积期及岩浆热液叠加改造期形成时代十分接近,介于 407~401 Ma,为早泥盆世火山喷发和岩浆侵入活动的产物。

致谢: 在野外工作期间得到新疆有色地勘局总工程师申茂德,新疆有色地勘局 706 队各级领导和技术人员的帮助; 得到国家 305 项目办公室的大力支持。同位素测年和硫同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成,在此一并致以衷心的感谢。

7　参考文献

[1] 杨富全,刘锋,柴凤梅,张志欣,耿新霞,吕书君,姜丽萍,欧阳刘进. 新疆阿尔泰铁矿: 地质特征、时空分布及成矿作用[J]. 矿床地质,2011,30(4): 575-598.

[2] 张建中,冯秉寰. 新疆阿尔泰阿巴宫-蒙库海相火山岩与铁矿的成生关系及成矿地质特征[J]. 中国地质科学院西安地质研究所所刊,1987(20): 89-180.

[3] 王登红,陈毓川,徐志刚,李天德,傅旭杰. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社,2002: 1-493.

[4] 闫升好,张招崇,王义天,陈柏林,周刚,何立新. 新疆阿尔泰山南缘乔夏哈拉式铁铜矿床稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质,2005,24(1): 25-33.

[5] 应立娟,王登红,李建康,陈郑辉,席忠,杨文华,刘乃忠. 新疆乔夏哈拉铁铜金矿床与国内外 IOCG 矿床的对比研究[J]. 大地构造与成矿学,2008,32(3): 338-345.

[6] 应立娟,王登红,梁婷,周汝洪. 新疆乔夏哈拉铁铜金矿的矿床成因及其成矿模式[J]. 矿床地质,2009,28(2): 211-217.

[7] 杨富全,毛景文,柴凤梅,刘锋,周刚,耿新霞,刘国仁,徐林刚. 新疆阿尔泰蒙库铁矿床成矿流体及成矿作用[J]. 矿床地质,2008,27(6): 659-680.

[8] 杨富全,张志欣,屈文俊,耿新霞,吕书君,柴凤梅,姜丽萍,刘锋. 新疆阿尔泰蒙库铁矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄及意义[J]. 地质学报,2011,85(3): 396-404.

[9] 刘锋,杨富全,李延河,马宝钦,柴凤梅,耿新霞. 新疆阿勒泰市阿巴宫铁矿磷灰石微量和稀土元素特征及矿床成因探讨[J]. 矿床地质,2009,28(3): 251-264.

[10] 刘锋,杨富全,李延河,郭正林,柴凤梅,耿新霞,张志欣. 新疆阿尔泰南缘萨尔布拉克铁矿区花岗岩年代学及地球化学研究[J]. 地质学报,2010,84(2): 195-205.

[11] Xu L G, Mao J W, Yang F Q, Daniel H, Zheng J M. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39: 423-440.

[12] 张志欣,杨富全,柴凤梅,刘锋,耿新霞,吕书君,姜丽萍,钟天智,欧阳刘进. 新疆阿尔泰乌吐布拉克铁矿床稀土元素地球化学研究[J]. 矿床地质,2011,30(1): 87-102.

[13] 姜丽萍,柴凤梅,杨富全,刘锋,张志欣,耿新霞,吕书君. 新疆阿尔泰两棵树铁矿区二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石定年及地质意义[J]. 现代地质,2011,

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

25(4): 712 – 719.

[14] 吕书君,杨富全,柴凤梅,张希兵,姜丽萍,刘锋,张志欣,耿新霞,欧阳刘进. 东准噶尔北缘老山口铁铜金矿区侵入岩 LA – ICP – MS 锆石 U – Pb 定年及地质意义[J]. 地质论评,2012,58(1): 149 – 164.

[15] 黄承科,朱天伦,李长江,童满云,潘一. 新疆阿勒泰市托莫尔特铁普查报告[R]. 2007.

[16] 何国琦,成守德,徐新,李锦轶,郝杰. 中国新疆及邻区大地构造图(1: 2500000)说明书[M]. 北京: 地质出版社,2004: 1 – 65.

[17] 柴凤梅,董连慧,杨富全,刘锋,耿新霞,黄承科. 阿尔泰南缘克朗盆地铁木尔特花岗岩体年龄、地球化学特征及成因[J]. 岩石学报,2010,26(2): 377 – 386.

[18] 刘锋,杨富全,毛景文,柴凤梅,耿新霞. 阿尔泰造山带阿巴宫花岗岩体年代学及地球化学研究[J]. 岩石学报,2009,25(6): 1416 – 1425.

[19] 王涛,洪大卫,童英,韩宝福,石玉若. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. 岩石学报,2005,21(3): 640 – 650.

[20] Wang T, Jahn B M, Kovachet V P. Mesozoic anoro-genic granitic granitic magatism in the Altai Paleozoic accretionary orogen, NW China, and its implications for crustal architecture and growth [C]// AOGS 5th Annual General Meeting. Korea, 2008: Abstract SE 53 – A010.

[21] Chen B, Jahn B M. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications [J]. *Geological Magazine*, 2002, 139(1): 1 – 13.

[22] Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U. Plesovice zircon—A new natural reference material for U – Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 2008, 249: 1 – 35.

[23] 侯可军,李延河,田有荣. LA – MC – ICP – MS 锆石微区原位 U – Pb 定年技术[J]. 矿床地质,2009,28(4): 481 – 492.

[24] Belousova E A, Griffin W L, O´Reilly S Y, Fisher N I. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143: 602 – 622.

[25] Chai F M, Mao J W, Dong L H, Yang F Q, Liu F, Geng X X, Zhang Z X. Geochronology of metarhyolites from the Kangbutiebao formation in the Kelang basin, Altay Mountains, Xinjiang: Implications for the tectonic evolution and metallogeny [J]. *Gondwana Research*, 2009, 16: 189 – 200.

[26] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社,2000: 218 – 247.

[27] 耿新霞,杨富全,杨建民,郭正林,郭旭吉,黄承科,刘锋,柴凤梅,张志欣. 新疆阿尔泰铁木尔特铅锌矿床稳定同位素组成特征[J]. 矿床地质,2010,29(6): 1088 – 1100.

[28] 刘敏,张作衡,王永强,郭旭吉. 新疆阿尔泰大东沟铅锌矿床地质特征及稳定同位素地球化学研究[J]. 地质学报,2008, 82(11): 1504 – 1513.

[29] Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry (3rd edition) [M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 1997: 1 – 250.

[30] Windley B F, Kroener A, Guo J, Qu G, Li Y, Zhang C. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution [J]. *Journal of Geology*, 2002, 110(6): 719 – 737.

[31] 王涛,童英,李舢,张建军,史兴俊,李锦轶,韩宝福,洪大卫. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J]. 岩石矿物学杂志,2010,29(6): 595 – 618.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net