

文章编号: 0258-7106(2012)05-1119-13

新疆阿尔泰山南缘大东沟铅锌矿区火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义*

耿新霞¹ 杨富全¹ 柴凤梅² 刘敏¹ 郭旭吉³ 郭正林⁴ 刘锋¹ 张志欣⁵

(1 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; 2 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; 3 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 706 队, 新疆 阿勒泰 836500; 4 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局, 新疆 乌鲁木齐 830000; 5 中国科学院新疆生态与地理研究所 新疆矿产资源研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要 大东沟铅锌矿位于新疆阿尔泰山南缘的克兰盆地, 赋存于康布铁堡组上亚组火山-沉积岩系, 矿体直接围岩为变质钙质砂岩及不纯的大理岩, 矿体呈层状、似层状、透镜状分布, 与地层产状一致。利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年法, 获得矿区 2 件康布铁堡组上亚组变质流纹岩加权平均年龄分别为 $(388.9 \pm 3.2) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 3.3$) 和 $(400.7 \pm 1.6) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.3$)。结合前人的年龄数据, 将克兰盆地康布铁堡组的时代厘定为晚志留世末期至早泥盆世 ($413 \sim 389 \text{ Ma}$)。大东沟铅锌矿为火山岩容矿的喷流沉积型矿床 (VMS), 2 件变质流纹岩年龄限定大东沟铅锌矿的成矿作用发生在早泥盆世 ($401 \sim 389 \text{ Ma}$)。

关键词 地球化学; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 变质流纹岩; 大东沟铅锌矿; 阿尔泰山南缘; 新疆

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

LA-ICP-MS U-Pb dating of volcanic rocks from Dadonggou ore district on southern margin of Altay in Xinjiang and its geological implications

GENG XinXia¹, YANG FuQuan¹, CHAI FengMei², LIU Min¹, GUO XuJi³, GUO ZhengLin⁴,
LIU Feng¹ and ZHANG ZhiXin⁵

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic processes and Metallogenic Prognosis of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang University, Urumq 830046, Xinjiang, China; 3 No. 706 Geological Party, Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals, Altay 836500, Xinjiang, China; 4 Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals, Urumq 830000, Xinjiang, China; 5 Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract

The Dadonggou Pb-Zn ore deposit is located in Kelan basin on the southern margin of Altay, Xinjiang. The ore-bearing country rock of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit is volcanogene sedimentary rock of the Upper sub-formation of the Kangbutiebao Formation. The ore bodies occur in banded, bedded and lenticular forms, consistent with the stratigraphic attitude. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages are reported for two meta-rhyolite samples

* 本文得到公益性行业科研专项经费课题 (编号 200911007-06) 和国家科技支撑计划专题 (编号 2006BAB07B02-01; 2011BAB06B03-02) 联合资助

第一作者简介 耿新霞, 女, 1979 年生, 博士, 矿产普查与资源评价专业。Email: gengxinxia0536@sina.com

收稿日期 2012-07-01; 改回日期 2012-08-20。秦思婷编辑。

from the Kangbutiebao Formation. The weighted mean $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ages of the two samples are (388.9 ± 3.2) Ma (MSWD=3.3) and (400.7 ± 1.6) Ma (MSWD=1.3). According to the results obtained by age data available, the Kangbutiebao Formation in Kelan basin should be of Late Silurian-Early Devonian period (413~389 Ma). The Dadonggou Pb-Zn ore deposit belongs to VMS-type, and the zircon LA-ICP-MS U-Pb data of the meta-rhyolite confine the formation of the Pb-Zn ore deposit to the Early Devonian (401~389 Ma).

Key words: geochemistry, zircon LA-ICP-MS U-Pb data, meta-rhyolite samples, Dadonggou Pb-Zn deposit, southern margin of Altay, Xinjiang

哈萨克斯坦境内的阿尔泰成矿带是世界著名的VMS型铜多金属成矿带之一(Daukeev et al., 2004),已发现十余个大型和超大型矿床,如尼古拉耶夫大型铜锌矿、马列耶夫大型铜锌矿、列宁诺戈尔斯克超大型铅锌铜多金属矿、孜良诺夫斯克超大型铅锌多金属矿等(涂光炽,1999;戴自希等,2001;杨富全等,2006;何国琦等,2006)。新疆阿尔泰南缘是其东延部分,已发现阿舍勒大型铜锌矿(王登红等,2002)、可可塔勒大型铅锌矿(王京彬,1998)、铁木尔特中型铅锌铜矿(徐九华等,2009;耿新霞等,2010)、大东沟中型铅锌矿(刘敏等,2008)等。新疆阿尔泰南缘的铜、铅锌矿主要分布于阿舍勒、冲乎尔、克兰和麦兹4个斜列的火山沉积盆地内。近年来找矿工作又取得了重要进展,如阿舍勒铜锌矿深部、可可塔勒铅锌矿深部均发现了隐伏矿体,在塔拉特发现了富铅锌矿体等,阿尔泰南缘泥盆纪火山作用与成矿,一直是研究的热点。康布铁堡组是重要的含矿火山-沉积岩系,已发现的铜、铅锌、铁、金矿多数赋存于该组中。前人从火山岩的岩石组合、地球化学特征、含矿特征及成矿作用等方面作了大量的研究工作(吴志亮,1992;吴志亮等,1996;于学元等,1993;牛贺才等,2006;Xu et al.,2003;丛峰等,2007;龙晓平等,2008;单强等,2011),也对康布铁堡组年龄进行过测定(张进红等,2000;Chai et al.,2009;柴凤梅等,2009,2012;杨富全等,2011)。位于克兰盆地的大东沟铅锌矿为中型VMS矿床,已对其矿体特征、同位素、流体包裹体等方面进行了研究(焦学军等,2005;李思强等,2006;刘敏等,2008,2009;褚海霞等,2010;张忠利,2011),但缺乏矿区含矿火山-沉积岩系及成矿时代的年龄数据。

在克兰盆地中,康布铁堡组地层层理清晰,其内的岩石发生了浅变质作用,但原岩仍可辨认。本文利用LA-ICP-MS锆石U-Pb定年法,对大东沟铅锌矿区的康布铁堡组变质流纹岩进行了年龄测定,岩相学特征表明所采的2件变质流纹岩的原岩结构和

构造仍然保留。本文的测试结果为克兰火山沉积盆地的形成及演化提供了重要的年代学资料,同时也限定了大东沟铅锌矿的成矿时代。

1 成矿地质背景

阿尔泰造山带呈NW-SE向,长约500 km(图1),是中亚造山带的重要组成部分,为古生代不同时期增生-碰撞事件和晚期阿尔卑斯变形叠加改造的结果(Berzin et al.,1994;Sengor et al.,1996;Windley et al.,2002;Li et al.,2003;李锦轶,2004;毛景文等,2006;Xiao et al.,2010),其构造位置处于西伯利亚板块。区内主体构造格架呈NW-SE向,主要断裂有额尔齐斯断裂、玛尔卡库里断裂、克兹加尔断裂、冲乎尔断裂、阿巴宫-库尔特断裂、巴塞断裂、卡拉先格尔断裂等,将阿尔泰造山带大致分为北、中、南3个块体(Li et al.,2003;Zhu et al.,2006;Wang et al.,2006)。

克兰盆地位于阿尔泰造山带南缘(图1),呈NW-SE向展布,北西起点为莫尤勒特,南东至阿巴宫,总长约100 km,宽约10 km(王向阳,2009)。基底为中-晚奥陶世花岗岩和中-上志留统库鲁木提群,后者主要岩性为条带状混合岩、矽线黑云斜长片麻岩、十字石柱石绿泥石二云母片岩、变质砂岩等。克兰盆地的主体是上志留统一下泥盆统康布铁堡组、中-上泥盆统阿勒泰镇组。康布铁堡组为一套变质海相中酸性火山岩-火山碎屑岩-陆源碎屑沉积岩-碳酸盐岩建造,与下伏库鲁木提群呈断层接触。康布铁堡组可划分为上、下2个亚组,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、变质凝灰岩夹片麻岩、绿泥黑云片岩、大理岩薄层或透镜体。阿勒泰镇组与下伏康布铁堡组整体呈整合接触,局部为断层接触,为一套浅变质浅海相的陆源碎屑岩,夹基性火山岩、火山碎屑岩、硅质岩和碳酸盐岩。

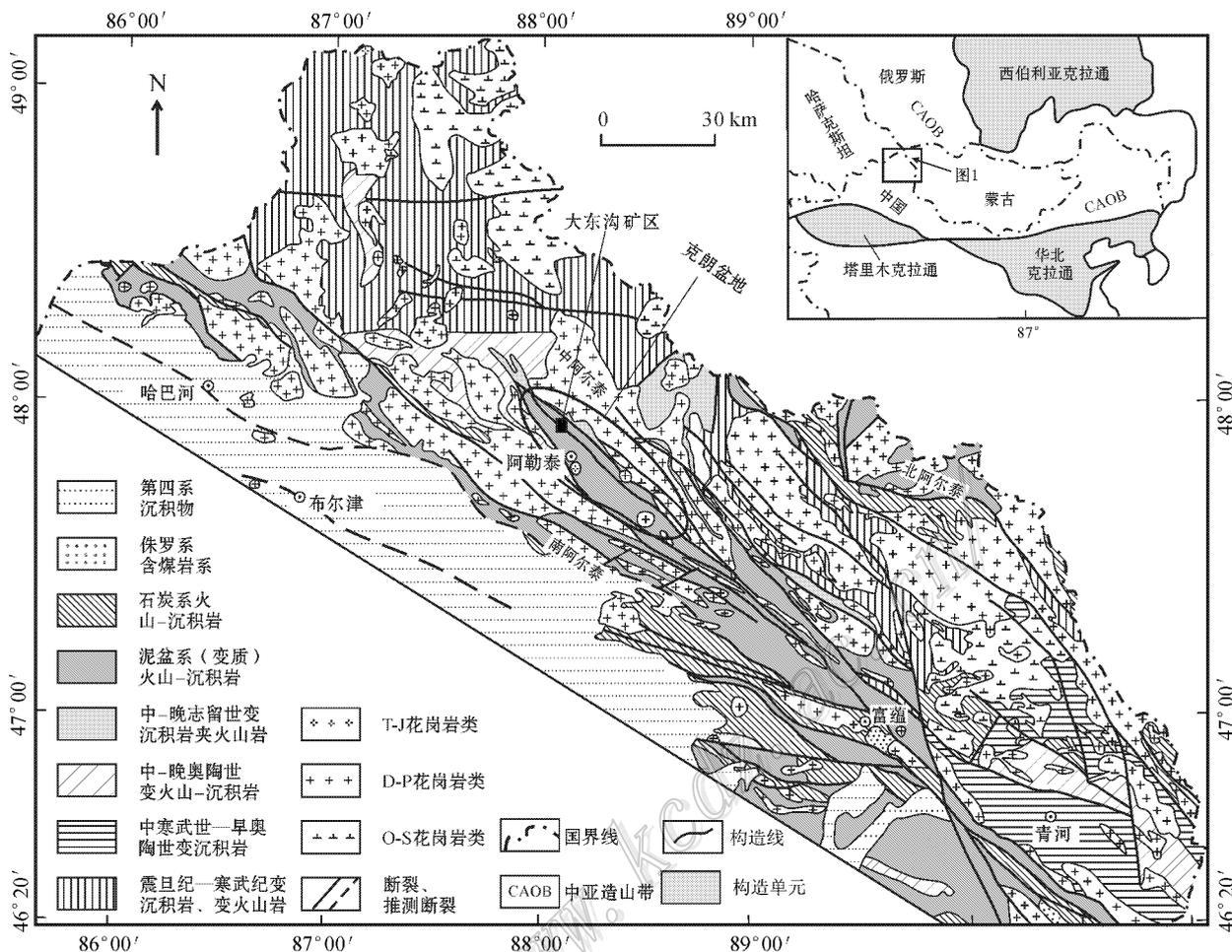


图 1 新疆阿尔泰山南缘造山带区域地质图(据杨富全等 2011)

Fig. 1 Geological sketch map of the south margin of the Altay orogenic belt(modified after Yang et al., 2011)

区域构造以阿勒泰复式向斜为主体,内部有次级褶皱及断裂,以紧闭的线性褶皱为主。康布铁堡组在岩性-岩相上明显受断裂构造控制,南西缘的阿克巴斯套断裂、北东缘的克因宫断裂为区域控盆断裂,控制泥盆系的分布(郭正林等 2007)。

区域上早泥盆世火山活动强烈,以中性-酸性为主,主要有流纹质、英安质火山碎屑岩及熔岩,有少量基性岩;中泥盆世火山活动减弱,以基性为主,主要有玄武质凝灰岩。区域侵入岩以花岗岩为主,其时代有中-晚奥陶世(如阿巴宫北和铁木尔特北岩体时代为(463.5 ± 3.6) Ma、(457.8 ± 3.1) Ma 和 (459 ± 4.9) Ma;刘锋等 2009;柴凤梅等 2010)、二叠纪(如喇嘛昭岩体时代为(279 ± 9) Ma;王涛等, 2005)、三叠纪(如将军山,时代为 245 Ma;王中刚等,1998)和侏罗纪(如尚可兰,时代为 181 ~ 177

Ma;王登红等 2002)。

2 矿床地质特征

2.1 地层

大东沟铅锌矿位于阿勒泰市北约 12 km 处。矿区出露的地层主要为上志留统一下泥盆统康布铁堡组上亚组(图 2A)。该组分为 3 个岩性段(图 2B),第一岩性段为火山碎屑岩,主要岩性是变质流纹质晶屑凝灰岩、变质流纹质凝灰岩等;第二岩性段是含矿层位,为一套碳酸盐沉积建造及碎屑岩建造,主要岩石组合是变质钙质砂岩、大理岩、不纯大理岩、黑云母绿泥片岩、铁锰质大理岩等;第三岩性段在矿区出露不全,主要岩性为变质流纹质晶屑凝灰岩。

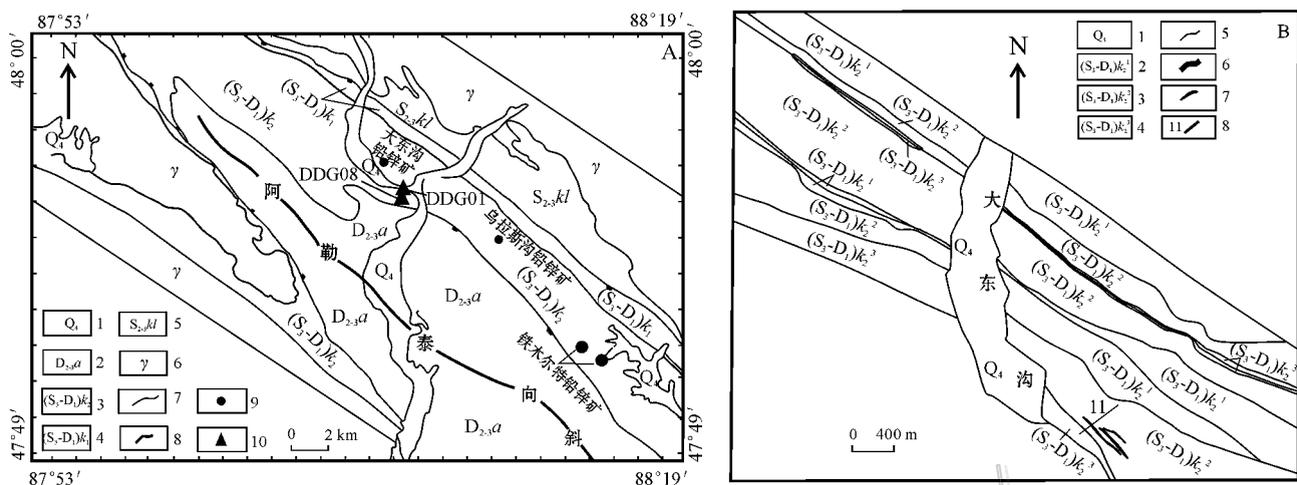


图2 大东沟铅锌矿区域地质图^①(A)及大东沟铅锌矿矿区地质图^②(B)

A: 1—第四系; 2—阿勒泰镇组; 3—康布铁堡组上亚组; 4—康布铁堡组下亚组; 5—库鲁木提群; 6—花岗岩; 7—地质界线; 8—褶皱; 9—铅锌矿床; 10—采样位置

B: 1—第四系; 2—康布铁堡组上亚组第一岩性段; 3—康布铁堡组上亚组第二岩性段; 4—康布铁堡组上亚组第三岩性段; 5—地质界线; 6—褶皱; 7—铅锌矿体; 8—勘探线剖面线位置

fig. 2 Geological sketch map of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit (A) and Geological Map of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit (B)

A: 1—Quaternary; 2—Altay Formation; 3—Kangbutiebao Upper Subformation; 4—Kangbutiebao Lower Subformation; 5—Kulumuti Group; 6—Geological boundary; 7—Geological boundary; 8—Fold; 9—Lead and zinc deposit; 10—Sampling location

B: 1—Quaternary; 2—1st Member of Upper Subformation of Kangbutiebao Formation; 3—2nd Member of Upper Subformation of Kangbutiebao Formation; 4—3rd Member of Upper Subformation of Kangbutiebao Formation; 5—Geological boundary; 6—Fold; 7—Pb-Zn ore body; 8—Location of exploration line

2.2 矿化特征及热液蚀变

矿区已圈定 20 余条铅锌矿体,矿体呈层状、似层状及透镜状。矿体一般长 300~600 m,宽 1~5 m,矿体沿倾斜向深部最大延深至 500 余米,11 线勘探线(图 2B、图 3)控制 4 号矿化体,矿体沿倾向呈现尖灭再现的特点,控制斜深 410 m,垂深 405 m。矿石类型以方铅矿-闪锌矿-黄铁矿矿石、方铅矿-闪锌矿矿石为主,其次是闪锌矿-黄铁矿矿石、方铅矿-黄铁矿矿石。矿石构造主要有浸染状、细脉状和条带状构造(图 4A-C)。矿石结构有自形-半自形粒状结构、他形粒状结构及交代熔蚀结构。矿石矿物主要有闪锌矿、方铅矿、磁铁矿、黄铁矿,其次是黄铜矿、磁黄铁矿、毒砂等。脉石矿物主要有石英、长石、绢云母、黑云母、白云母等,次之为绿泥石、绿帘石、萤石和石榴子石等。铅锌的平均品位是 1.3%~4.5%。

矿区热液蚀变发育,主要有绢云母化、碳酸盐化、矽卡岩化、硅化、叶蜡石化、高岭石化、黄铁矿化等。依据不同矿化类型的野外穿插关系,以及矿石结构构造特征、产出状态及矿物组合关系,成矿过程可划分为 3 个阶段:与矽卡岩有关的铅锌矿化阶段、多金属硫化物阶段和石英脉型铅锌成矿阶段(图 4D-F)。

3 样品特征及分析方法

3.1 样品位置及岩石学特征

2 件样品均采自大东沟铅锌矿区的康布铁堡组上亚组(图 2A、图 5),均为变质程度较低的新鲜样品,编号为 DDG01(坐标: E88°07′24.1″, N47°56′20.6″)和 DDG08(坐标: E88°07′20.2″, N47°56′3.4″)。

① 新疆有色地质勘查局 706 队. 2003. 1:100 000 区域地质矿产图. 内部资料.

② 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 706 队. 2008. 新疆阿勒泰市大东沟铅锌矿普查报告. 内部资料.

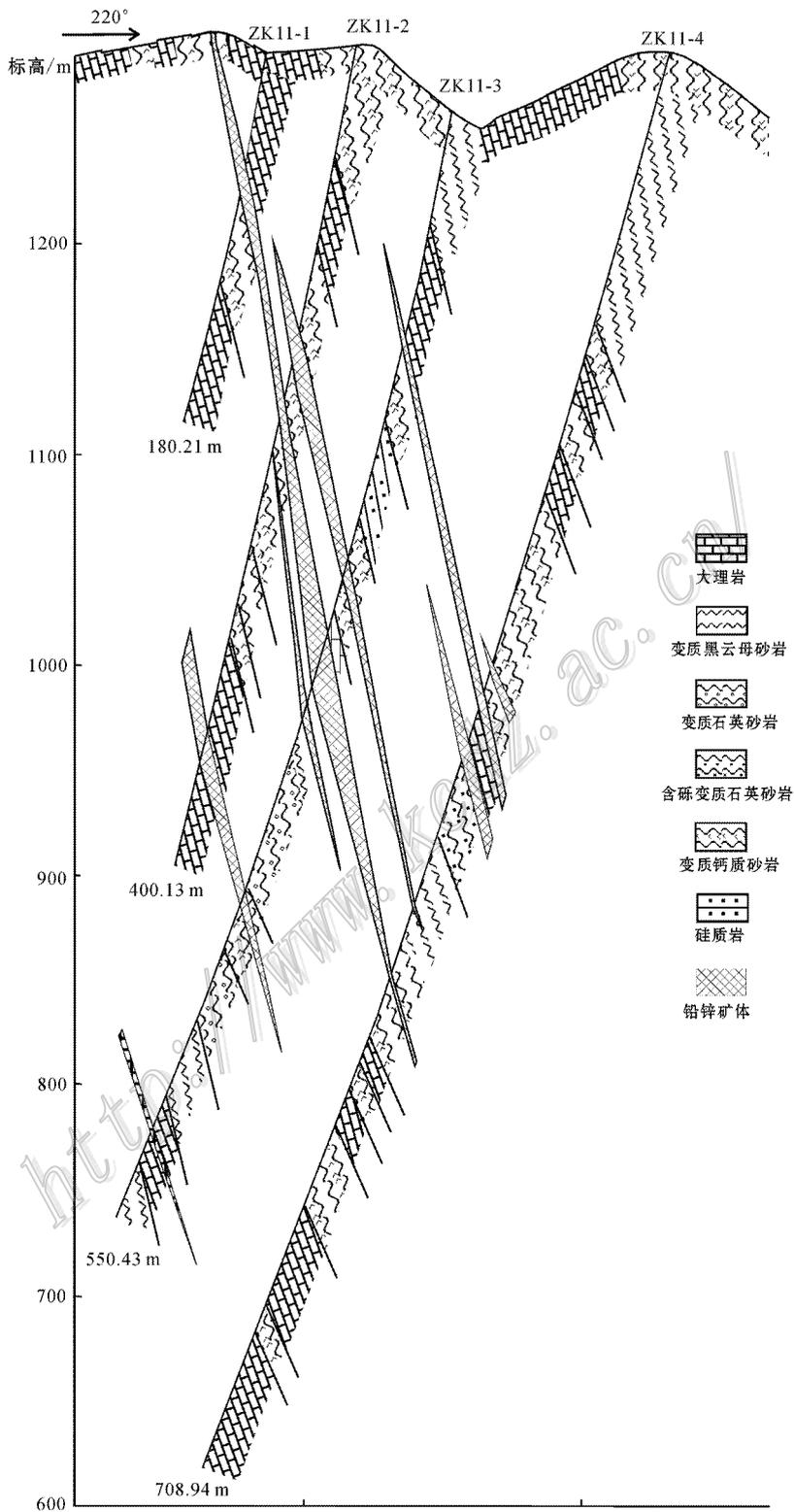


图 3 大东沟铅锌矿 11 号勘探线剖面图^①

Fig. 3 Geological section along No. 11 exploration line of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit (after No. 706 Geological Party of Xinjiang Geology and Exploration Bureau for Nonferrous Metals, 2008)

① 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 706 队. 2008. 新疆阿勒泰市大东沟铅锌矿普查报告. 内部资料.

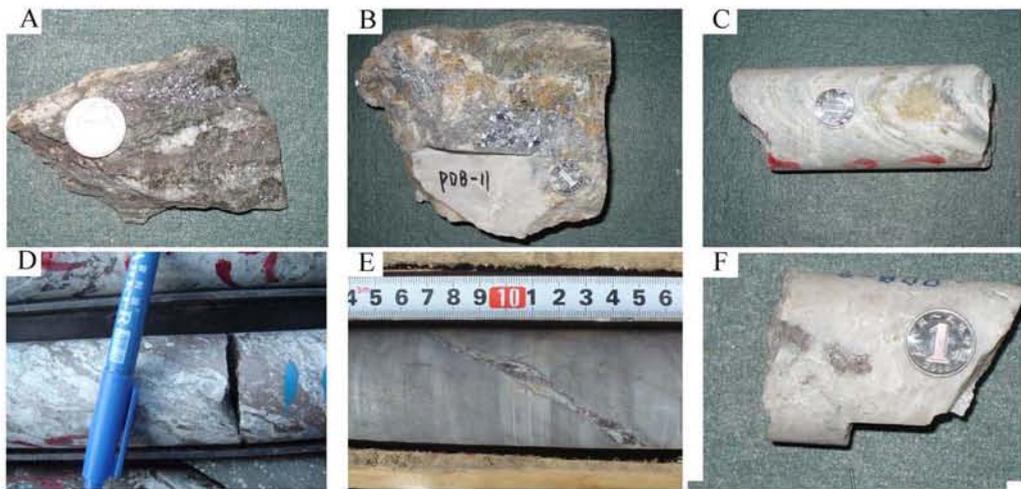


图4 大东沟铅锌矿床矿化特征(来自刘敏)

A. 块状闪锌矿; B. 块状方铅矿; C. 条带状磁铁矿; D. 铅锌矿化砂卡岩; E. 铅锌矿化大理岩; F. 铅锌矿化石英脉

Fig. 4 Mineralization characteristics of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit

A. Massive sphalerite; B. Massive galena; C. Banded magnetite; D. Lead-zinc mineralized skarn; E. Lead-zinc mineralized marble; F. Lead zinc mineralized quartz vein

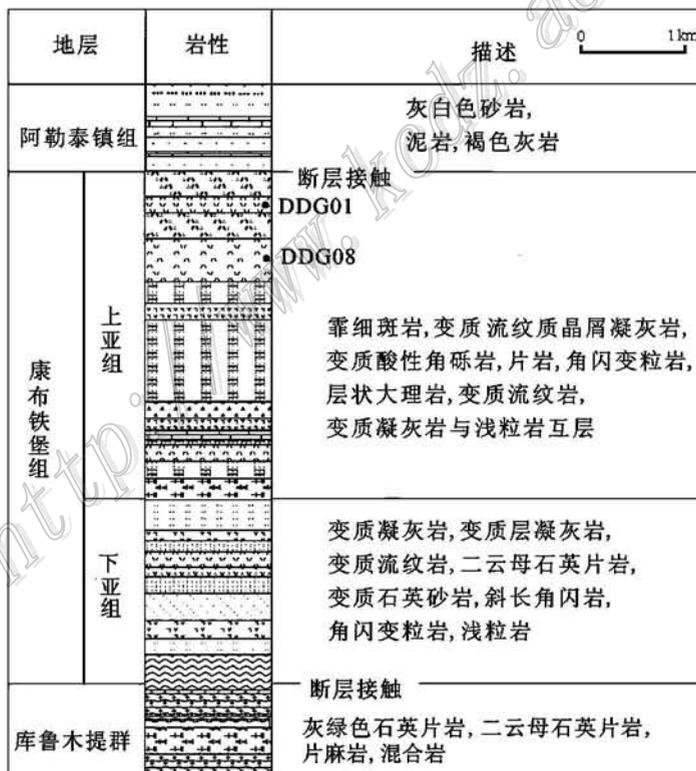


图5 大东沟铅锌矿区地层柱状图

Fig. 5 Stratigraphic column of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit

2件变质流纹岩呈浅灰色-灰白色, 变余流纹状构造, 变余斑状结构(图6A)。斑晶约占20%, 主要由石英、微斜长石组成, 石英斑晶呈半自形粒状, 具有熔蚀外形(图6B), 石英受构造挤压破碎并具有波

状消光(图6C、D), 石英斑晶直径约0.5~2.5 mm, 微斜长石呈自形-半自形板状, 其表面有少量次生方解石分布, 微斜长石的长轴约1~3 mm。基质具有微晶结构, 由长英质矿物、白云母、绢云母组成(图

6E、F)。岩石受区域构造及热液蚀变作用,具有鳞片粒状变晶结构,发育片理化,沿片理有绢云母定向分布,在绢云母间有粒状石英和微斜长石分布,在长英质矿物间偶有粒状黄铁矿分布。

3.2 分析方法

本次研究的锆石是从每件约 10 kg 的变质流纹

岩样品(DDG01、DDG08)中挑选出的。样品的破碎和锆石的挑选由廊坊市科大技术服务公司完成。将样品碎至 60 目后进行粗淘,然后经过精淘后再对样品进行重液分离和磁选,获得纯度大于 90% 的锆石,再在双目镜下进行挑纯。锆石样品靶的制作和锆石阴极发光照像在北京离子探针中心完成,

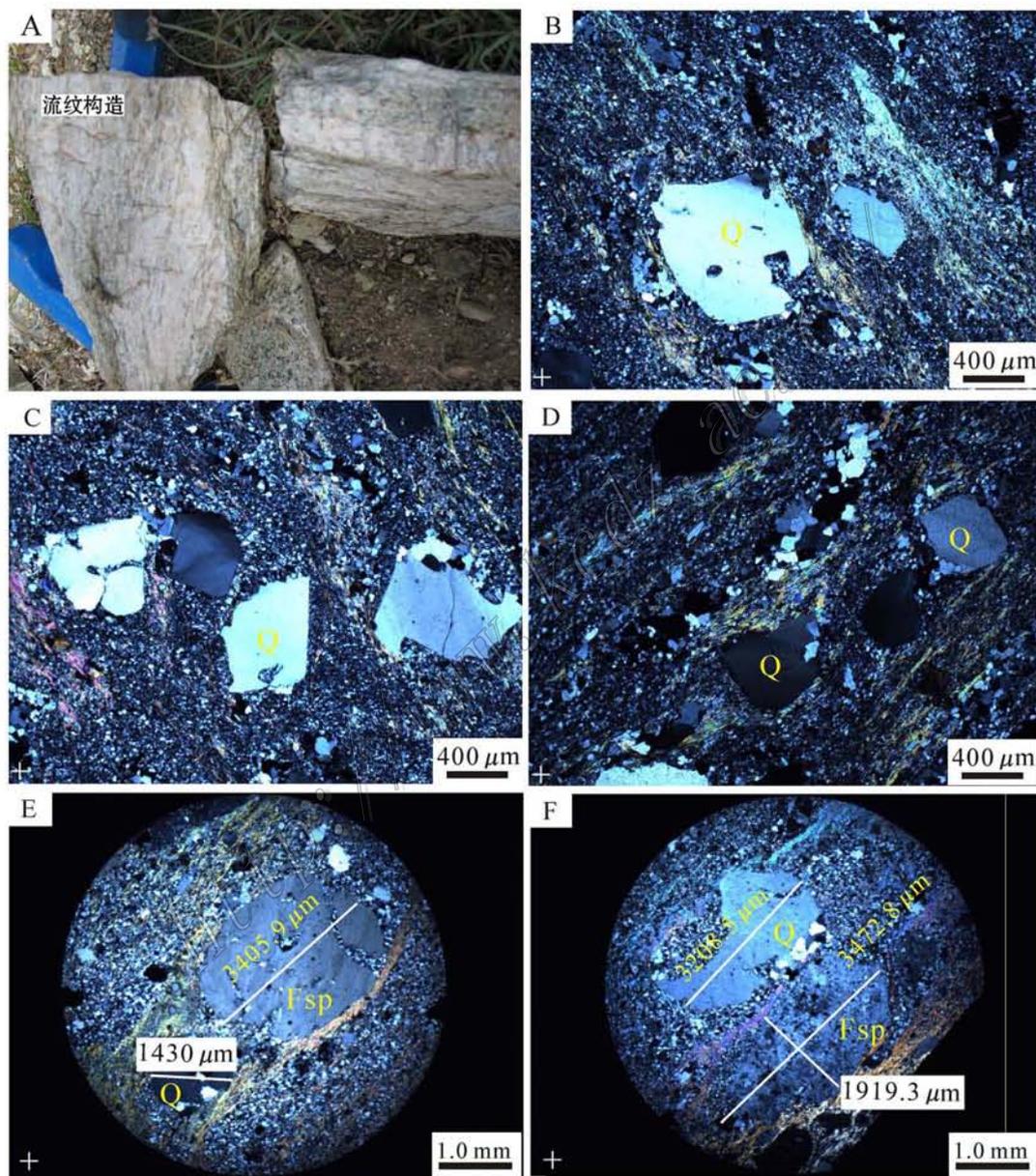


图 6 变质流纹岩样品手标本及显微照片

- A. 变质流纹岩; B. 变质流纹岩呈斑状结构; C. 棱角状石英斑晶,具波状消光; D. 熔圆状石英斑晶,具波状消光;
E. 浑圆状破碎的石英斑晶,基质脱玻化; F. 变质流纹岩中石英长石斑晶; Q—石英; Fsp—长石

Fig. 6 Hand specimen photographs and microphotographs of meta-rhyolite

- A. Meta-rhyolite; B. Meta-rhyolite with porphyritic texture; C. Angular quartz phenocrysts with undulatory extinction; D. Round quartz phenocrysts with undulatory extinction; E. Round and shattered quartz phenocryst with devitrification matrix; F. Quartz and feldspar phenocryst in the meta-rhyolite; Q—Quartz; Fsp—Feldspar

将挑选好的锆石颗粒粘在双面胶上,用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后抛光,使锆石抛掉一半露出一个平面,制成样品靶,然后进行锆石的透、反射电子像(BSE)及阴极发光图像分析(CL),观察锆石的晶体形态和内部结构。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测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 LA-ICP-MS 及与之配套的 New wave UP 213 激光剥蚀系统,详细的分析流程和原理见参考文献(Campston et al., 1984; Williams, 1992; 宋彪等, 2002; 侯可军等, 2009)。样品测试过程中,尽量选择生长环带明显,无包裹体和裂纹的锆石晶体或避开锆石中的裂纹和包裹体。

LA-ICP-MS 激光剥蚀采用单点剥蚀的方式,测试前用锆石 GJ-1 进行仪器调试,使之达到最优状态,锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, $w(U) \lambda w(Th)$ 以锆石 M127($w(U) = 923 \times 10^{-6}$ 、 $w(Th) = 439 \times 10^{-6}$ 、 $Th/U = 0.475$; Nasdala et al., 2008) 为外标进行校正。测试过程中,每测定 10 个样品点后,测定 3 次标准锆石样进行校正,即 2 个 GJ-1 锆石(607 Ma)和 1 个 Plesovice 锆石(337 Ma),观察仪器的状态以保证测试精度。数据处理采用 ICPMADat-aCa 4.3 程序(Liu et al., 2008),测试过程中,绝大多数分析点 $n(^{206}Pb)/n(^{204}Pb) > 1000$,未进行普通铅校正, ^{204}Pb 由离子计数器检测, $w(^{204}Pb)$ 异常高的分析点可能受包体等普通铅的影响,对 $w(^{204}Pb)$ 异常高的分析点在计算时剔除,锆石年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot 3.0 程序获得(Ludwig, 2001),表达式中所列单个数据点的误差均为 1σ ,加权平均年龄具 95% 的置信度。

3.3 锆石特征

2 件变质流纹岩样品中的锆石特征相似,在透、反射光下多呈浅黄褐色或无色,半透明-透明,部分颗粒破碎,许多颗粒边部略有磨圆。大多数锆石自形程度较高,为细长柱状、短柱状、板状、双锥状晶体,表面光滑,晶面清晰,少许锆石的自形程度较差。锆石粒度较小,长轴变化集中于 $60 \sim 200 \mu m$,长短轴比一般为 $1.5:1 \sim 3:1$ 。锆石阴极发光图像(图 7)显示,大部分锆石晶体内部发育较好的平直对称生长环带和扇状环带,表明其具有典型的岩浆成因特征(张作衡等, 2007),个别锆石颗粒中可见不透明的包裹体。

4 测试结果

2 件样品各选择 20 粒锆石进行 U-Pb 含量测定(表 1)。DDG01 样品 20 个锆石测点的 $w(^{238}U)$ 、 $w(^{232}Th)$ 变化于 $105.62 \times 10^{-6} \sim 1212.8 \times 10^{-6}$ 、 $92.54 \times 10^{-6} \sim 1343.67 \times 10^{-6}$,平均值分别为 381.72×10^{-6} 和 432.25×10^{-6} 。 $^{232}Th/^{238}U$ 比值变化较大,为 $0.51 \sim 3.10$,显示岩浆锆石 Th/U 比值典型特征(Th/U 比值一般大于 0.4; Rutatto, 2002),放射性成因 $w(Pb)$ 落于 $9.34 \times 10^{-6} \sim 102.65 \times 10^{-6}$ 之间。20 个测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值介于 $349.4 \sim 398.0$ Ma 之间,其中 14 个测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄变化范围较小,在误差范围内具有一致的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{235}U$ 、 $^{206}Pb/^{238}U$ 比值,其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄介于 $377.8 \sim 398.0$ Ma。在 $^{206}Pb/^{238}U$ - $^{207}Pb/^{238}U$ 谐和图上(图 8),14 个分析点聚集在谐和线上及其附近的一个较小的区域,表明这些锆石形成之后的 U-Pb 体系基本保持封闭状态,无 U 或者 Pb 同位素的明显丢失或加入。14 个点的加权平均年龄为 (388.9 ± 3.2) Ma,可以代表流纹岩的形成年龄。另外有 6 个点的年龄集中于 $349.4 \sim 363.0$ Ma 之间,年龄相对年轻的原因可归因于以下 2 种:① 样品为区域变质作用过程中发生热液活动的年龄,如锆石 1.5、1.8 颗粒小,边部细小,具有白边,可推测本类锆石受后期热液影响(Zhu, 2011);② 由于放射性铅的丢失使得锆石年龄年轻,如锆石 1.1 等。

DDG08 样品 20 个锆石测点的 $w(^{238}U)$ 和 $w(^{232}Th)$ 变化于 $68.60 \times 10^{-6} \sim 711.5 \times 10^{-6}$ 、 $33.63 \times 10^{-6} \sim 2248.2 \times 10^{-6}$ 。 $^{232}Th/^{238}U$ 比值变化较大($0.41 \sim 4.89$),显示了岩浆锆石的 Th/U 比值典型特征(Th/U 比值一般大于 0.4; Rutatto, 2002)。20 个测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄介于 $380.3 \sim 420.4$ Ma 之间,分成 3 组,第一组 16 个测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄变化范围较小,介于 $394.0 \sim 404.7$ Ma,在 $^{206}Pb/^{238}U$ - $^{207}Pb/^{238}U$ 谐和图上(图 8),16 个样品点分布在谐和线上及附近,样品的可信度较高,加权平均年龄为 (400.7 ± 1.6) Ma。从形态特征显示,这些锆石自形程度高,未发生蚀变等,因此,本组锆石的年龄可以代表流纹岩的年龄;第二组有 2 个测点(8.2、8.14)年龄分别为 380.3 Ma 和 385.2 Ma,

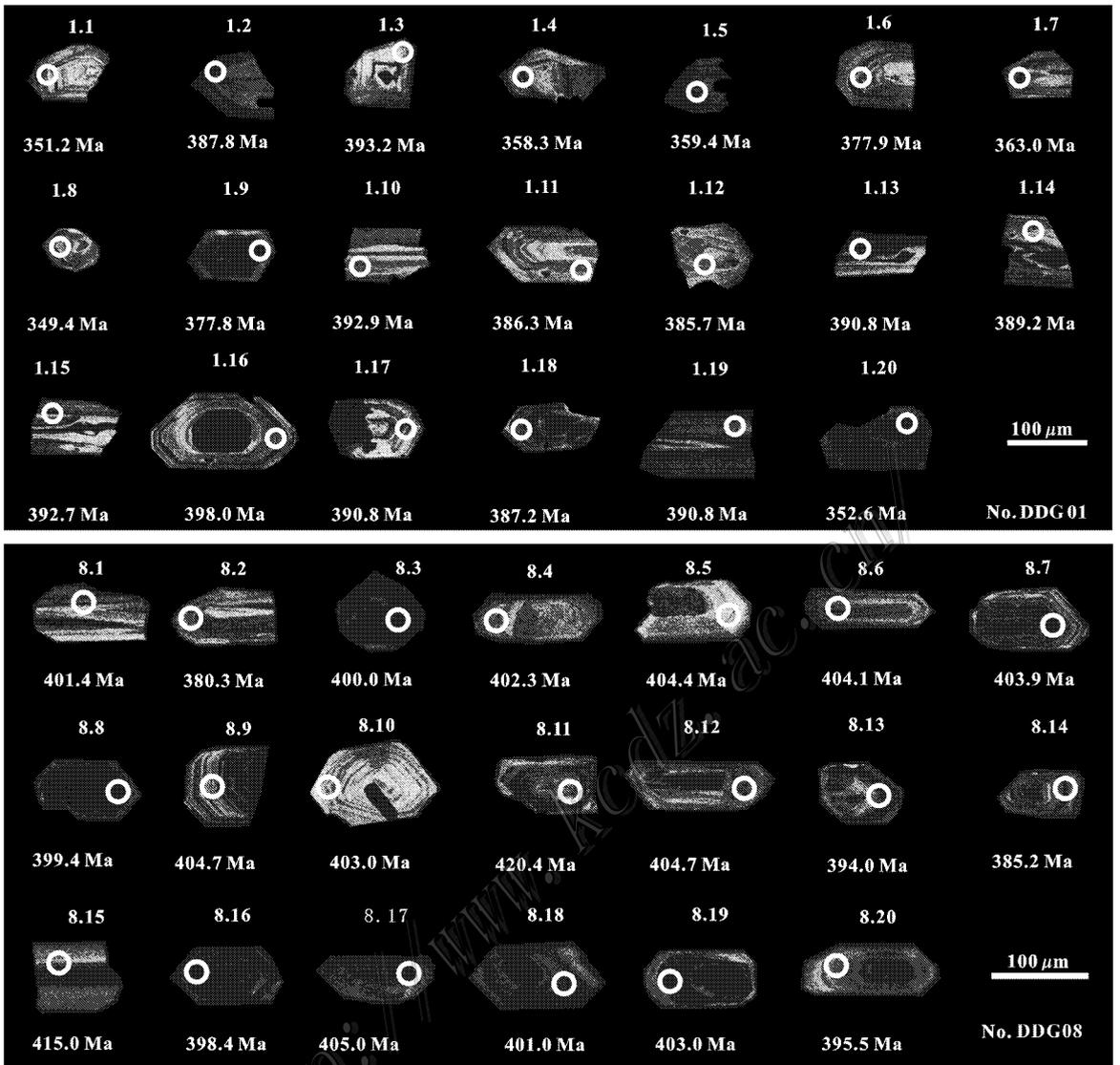


图 7 锆石的阴极发光图像

Fig. 7 Cathodoluminescence images of zircons from meta-rhyolites

可能代表研究区发生热液活动的年龄;第三组有 2 个测点(8.11、8.15),所测 $w(\text{Th})$ 和 $w(\text{Pb})$ 偏低而使年龄偏高,分别是 420.4 Ma 和 415.0 Ma,可能代表岩浆上升过程中捕获志留纪地层中锆石。

5 讨论

5.1 克兰盆地康布铁堡组时代

克兰盆地康布铁堡组地层创建于 1978 年的 1:20 万区域地质调查工作^①,在上亚组的灰岩中发现

了无洞贝(*Atypa cf. reticularis*)、无窗贝(*Athyris sp.*)和厚巢珊瑚等(*Pachyfavosites sp.*)化石。有关克兰盆地康布铁堡组的形成年龄,前人已进行过研究,如李华芹等(2004)利用单颗粒锆石蒸发法获得了阿巴宫铁矿区流纹斑岩的 Pb-Pb 同位素年龄,认为(381.2 ± 10.2) Ma 代表了该流纹斑岩和阿巴宫铁矿的形成年龄,同时,他们也获得了位于该组火山岩中的萨热阔布金矿矿石中石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄,认为(395 ± 39) Ma 代表了萨热阔布金矿的形成年龄,由于该组火山岩受到变质改造的影

① 新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1978. 阿勒泰幅 1:20 万区域地质调查报告. 内部资料.

表1 大东沟铅锌矿区变质流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from the meta-ryholites in the Dadonggou ore district

样号	测点	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$							
		$w(\text{B})/10^{-6}$	^{232}Th	^{238}U	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ					
DDg01	1	24.76	211.85	414.03	0.51	0.05598	0.000414	0.05665	0.00043	0.43708	0.00439	351.2	2.5	476.0	16.7	368.2	3.1
	2	22.96	247.54	247.23	1.00	0.06201	0.000578	0.05386	0.00028	0.46002	0.00457	387.8	3.5	364.9	11.1	384.3	3.2
	3	12.85	122.42	148.33	0.83	0.06289	0.000521	0.05420	0.00046	0.46851	0.00433	393.2	3.2	388.9	18.5	390.2	3.0
	4	37.64	436.71	429.05	1.02	0.05716	0.000468	0.05595	0.00054	0.44221	0.00729	358.3	2.9	450.0	22.2	371.8	5.1
	5	19.44	193.24	257.15	0.75	0.06734	0.000464	0.05776	0.00041	0.45696	0.00508	359.4	2.8	520.4	47.2	382.1	3.5
	6	53.73	698.61	489.97	1.43	0.06037	0.000519	0.05402	0.00021	0.44954	0.00405	377.9	3.2	372.3	12.0	377.0	2.8
	7	9.34	1045.93	336.85	3.10	0.05792	0.000409	0.05409	0.00053	0.01238	0.00495	363.0	2.5	2010.0	72.2	710.1	22.7
	8	22.72	259.86	253.80	1.02	0.05570	0.000480	0.05640	0.00061	0.43361	0.00661	349.4	2.9	477.8	28.7	365.7	4.7
	9	75.85	685.59	1212.8	0.57	0.06037	0.000521	0.05557	0.00016	0.46283	0.00433	377.8	3.2	435.2	7.4	386.2	3.0
	10	10.20	92.54	105.62	0.88	0.06285	0.000564	0.05462	0.00044	0.47246	0.00514	392.9	3.4	398.2	12.0	392.9	3.5
	11	17.63	194.13	187.63	1.03	0.06175	0.000465	0.05373	0.00032	0.45703	0.00392	386.3	2.8	361.2	13.0	382.2	2.7
	12	12.51	146.12	158.99	0.92	0.06165	0.000517	0.05369	0.00035	0.45579	0.00431	385.7	3.1	366.7	14.8	381.3	3.0
	13	30.51	285.15	425.92	0.67	0.06249	0.000590	0.05494	0.00022	0.47375	0.00310	390.8	3.6	409.3	23.1	393.8	3.5
	14	10.38	106.55	127.70	0.83	0.06224	0.000563	0.05354	0.00041	0.45894	0.00489	389.2	3.4	353.8	12.0	383.5	3.4
	15	37.80	458.12	385.94	1.19	0.06281	0.000383	0.05361	0.00021	0.46433	0.00324	392.7	2.3	353.8	9.3	387.3	2.2
	16	56.48	675.52	457.69	1.48	0.06369	0.000497	0.05412	0.00023	0.47463	0.00358	398.0	3.0	376.0	11.1	394.4	2.5
	17	42.65	522.26	363.13	1.44	0.06251	0.000449	0.05371	0.00026	0.46259	0.00352	390.8	2.7	366.7	11.1	386.1	2.4
	18	102.65	1343.67	852.28	1.58	0.06191	0.000469	0.05407	0.00017	0.47015	0.00372	387.2	2.8	416.7	5.6	391.3	2.6
	19	24.27	258.60	232.83	1.11	0.06249	0.000465	0.05468	0.00031	0.47064	0.00387	390.8	2.8	398.2	13.0	391.6	2.7
	20	28.81	660.57	547.37	1.21	0.05622	0.000493	0.05791	0.00041	0.44934	0.00551	352.6	3.0	527.8	16.7	376.8	3.9
DDg08	1	11.75	104.05	131.85	0.79	0.06425	0.000562	0.05501	0.00034	0.48665	0.00477	401.4	3.4	413.0	14.8	402.6	3.3
	2	20.20	158.82	339.00	0.47	0.06077	0.000516	0.05561	0.00039	0.46631	0.00548	380.3	3.1	435.2	16.7	388.6	3.8
	3	33.65	291.80	557.50	0.52	0.06402	0.000544	0.05448	0.00019	0.48115	0.00443	400.0	3.3	390.8	7.4	398.9	3.0
	4	13.38	105.27	178.24	0.59	0.06440	0.000747	0.05461	0.00033	0.48656	0.00720	402.3	4.5	394.5	13.0	402.6	4.9
	5	4.91	33.63	68.60	0.49	0.06475	0.000579	0.05534	0.00048	0.49323	0.00566	404.4	3.5	433.4	25.0	407.1	3.8
	6	17.35	166.03	188.74	0.88	0.06469	0.000621	0.05726	0.00047	0.51283	0.00757	404.1	3.8	501.9	18.5	420.3	5.1
	7	36.70	310.60	547.30	0.57	0.06465	0.000710	0.05670	0.00044	0.51012	0.00944	403.9	4.3	479.7	18.5	418.5	6.3
	8	43.92	372.54	711.50	0.52	0.06392	0.000465	0.05711	0.00028	0.50498	0.00538	399.4	2.8	494.5	11.1	415.1	3.6
	9	24.37	219.13	321.11	0.68	0.06479	0.000593	0.05436	0.00024	0.48510	0.00447	404.7	3.6	387.1	9.3	401.6	3.1
	10	6.70	60.65	114.59	0.53	0.06451	0.000500	0.05282	0.00034	0.46938	0.00425	403.0	3.0	320.4	19.4	390.8	2.9
	11	57.35	2248.20	459.52	4.89	0.06739	0.000509	0.08147	0.00181	0.75739	0.01746	420.4	3.1	1233.0	43.7	572.5	10.1
	12	28.23	268.89	356.76	0.75	0.06479	0.000530	0.05464	0.00022	0.48822	0.00435	404.7	3.2	398.2	9.3	403.7	3.0
	13	33.64	287.93	544.21	0.53	0.06302	0.000390	0.05499	0.00022	0.47812	0.00355	394.0	2.4	413.0	23.1	396.8	2.4
	14	28.14	293.52	328.13	0.89	0.06158	0.000618	0.05503	0.00027	0.46754	0.00541	385.2	3.8	413.0	16.7	389.5	3.7
	15	7.31	48.86	74.74	0.65	0.06640	0.000687	0.05548	0.00054	0.50684	0.00623	415.0	4.2	431.5	22.2	416.3	4.2
	16	42.64	381.53	643.92	0.59	0.06376	0.000382	0.05493	0.00016	0.48274	0.00287	398.4	2.3	409.3	25.0	400.0	2.0
	17	11.75	75.09	166.22	0.45	0.06484	0.000575	0.05416	0.00028	0.48386	0.00467	405.0	3.5	376.0	13.0	400.7	3.2
	18	19.10	128.19	311.07	0.41	0.06419	0.000495	0.05461	0.00024	0.48318	0.00405	401.0	3.0	394.5	9.3	400.3	2.8
	19	33.39	318.56	503.93	0.63	0.06451	0.000687	0.05636	0.00033	0.50276	0.00681	403.0	4.2	464.9	13.0	413.6	4.6
	20	15.42	128.67	211.41	0.61	0.06328	0.000581	0.05558	0.00038	0.48619	0.00636	395.5	3.5	435.2	14.8	402.3	4.3

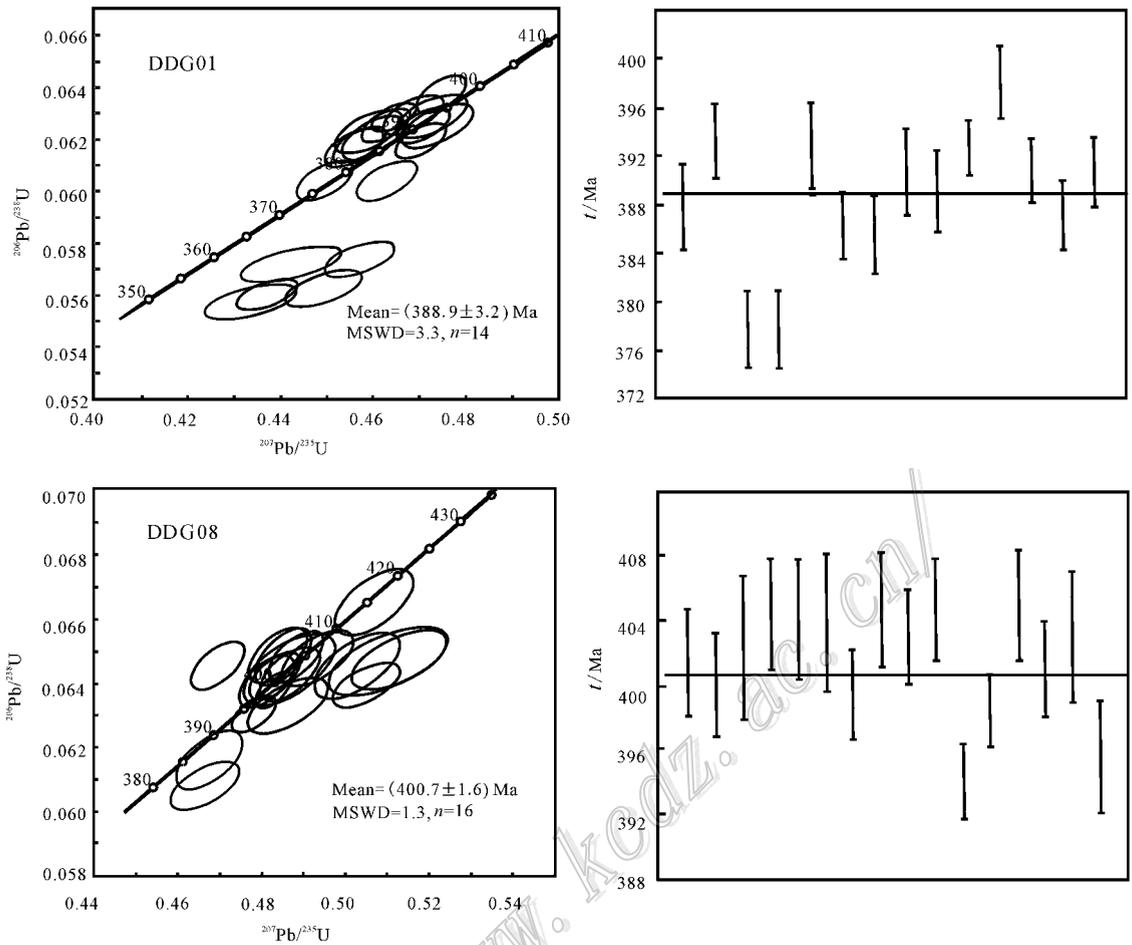


图 8 变质流纹岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 8 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram of meta-rhyolites from the Dadonggou Pb-Zn ore deposit

响,这些年龄不能代表火山岩的形成年龄,更可能代表的是变质热事件年龄。张进红等(2000)利用单颗粒锆石 U-Pb 法,获得了克兰盆地铁木尔特地区康布铁堡组上亚组第三岩性段的变质流纹岩锆石年龄,分布范围为 $(375.1 \pm 1.7) \text{ Ma} \sim (407.3 \pm 9.2) \text{ Ma}$,认为未受到后期热液事件影响的 2 号锆石的年龄 $[(407.3 \pm 9.2) \text{ Ma}]$ 为锆石结晶的年龄,代表康布铁堡组火山岩形成年龄。单强等(2011)获得铁木尔特地区康布铁堡组上亚组钾质流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(402.2 \pm 6.6) \text{ Ma}$ 。笔者课题组获得阿巴宫铁矿区康布铁堡组上亚组变质流纹岩的 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(412.6 \pm 3.5) \text{ Ma}$ 、铁木尔特矿区外围的康布铁堡组上亚组变质流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(406.7 \pm 4.3) \text{ Ma}$ (Chai et al., 2009)。

本次所测 2 件样品中的 30 粒锆石具有典型的

岩浆锆石特征,可指示锆石均是从岩浆中直接结晶而成的,其锆石的年龄代表火山岩年龄。样品 DDG01 的 14 个测点加权平均年龄为 $(388.9 \pm 3.2) \text{ Ma}$,样品 DDG08 的 16 个测点加权平均年龄为 $(400.7 \pm 1.6) \text{ Ma}$,二者都代表流纹岩的形成年龄。

综合前人对阿巴宫铁矿、铁木尔特铁矿及本文的大东沟铅锌矿的锆石 LA-ICP-MS 和 SHRIMP U-Pb 年龄,限定克兰盆地康布铁堡组上亚组火山岩形成于 $413 \sim 389 \text{ Ma}$ 。Chai 等(2009)考虑到,阿巴宫铁矿所测年龄 $[(412.6 \pm 3.5) \text{ Ma}]$ 样品并非采自康布铁堡组底部,其底部年龄肯定大于 413 Ma 。根据最新的国际地质年代划分方案(Gradstein et al., 2004),康布铁堡组的形成年代属于早泥盆世早期至中泥盆世中期,按照中国惯用的地质年代划分方案(410 Ma 为志留纪与泥盆纪分界),笔者将康布铁堡组时代厘定为晚志留世末期至早泥盆世。

5.2 大东沟铅锌矿的成矿年龄限定

大东沟铅锌矿区普遍发育硅质岩、局部硅化较强,并发育石膏层,具有典型的喷流沉积岩特征;铅锌矿体产于康布铁堡组上亚组第二岩性段,赋矿岩性主要为变质钙质砂岩及不纯的大理岩;矿体呈层状、似层状及透镜状顺层分布,矿体具层控性、时控性特征;矿石具有沉积韵律特征,指示同生沉积的特征。刘敏等(2008)获得矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-22.3\text{‰} \sim 11.7\text{‰}$,说明硫既有深源硫,也有海水 SO_4^{2-} 来源硫及生物来源硫。综合矿化特征及 $\delta^{34}\text{S}$ 测定,认为大东沟铅锌矿床为火山岩容矿的喷流沉积型矿床(VMS型),因此,大东沟铅锌矿的赋矿地层可以限定铅锌矿的成矿年龄,根据本文对康布铁堡组年龄的测试结果,可以限定大东沟铅锌矿的成矿年龄在401~389 Ma,为早泥盆世。

6 结 论

(1)大东沟铅锌矿区康布铁堡组2件变质流纹岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 (388.9 ± 3.2) Ma 和 (400.7 ± 1.6) Ma,结合课题组及前人在克兰盆地的高精度年龄数据,厘定康布铁堡组为晚志留世末期至早泥盆世(413~389 Ma)。

(2)大东沟铅锌矿为火山岩容矿的喷流沉积型矿床,其矿体产于上志留统一下泥盆统康布铁堡组上亚组第二岩性段,2件变质流纹岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄限定大东沟铅锌矿的成矿年龄在401~389 Ma,为早泥盆世成矿。

志谢 野外期间得到新疆维吾尔自治区有色地质勘查局706队的大力支持;锆石制靶与阴极发光照相在北京离子探针中心完成;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的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献/References

柴凤梅,毛景文,董连慧,杨富全,刘 锋,耿新霞,张志欣,黄承科. 2009. 阿尔泰山缘康布铁堡组变质火山岩年龄及岩石成因[J]. 岩石学报, 25(06): 1403-1415.

柴凤梅,董连慧,杨富全,刘 锋,耿新霞,黄承科. 2010. 阿尔泰山缘克兰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, 26(2): 377-386.

柴凤梅,杨富全,刘 锋,耿新霞,张志欣,陈 斌. 2012. 阿尔泰山缘

麦兹盆地康布铁堡组变质酸性火山岩年龄及岩石成因[J]. 地质科学, 47(1): 221-239.

丛 峰,唐红峰,苏玉平. 2007. 阿尔泰山缘泥盆纪流纹岩的地球化学和大地构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 31(3): 359-364.

褚海霞,徐九华,林龙华,卫晓锋,王琳琳,陈栋梁. 2010. 阿尔泰山大东沟铅锌矿的碳质流体及其成因[J]. 岩石矿物学杂志, 29(2): 175-188.

戴自希,白 冶,吴初国,古 方,朱明玉,尚修治. 2001. 中国西部和毗邻国家铜金找矿潜力的对比研究[M]. 北京:地震出版社, 1-201.

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. 2010. 新疆阿尔泰山铁木尔特铅锌矿床稳定同位素组成特征[J]. 矿床地质, 29(6): 1088-1100.

郭正林,郭旭吉,王书来,秦克章. 2007. 阿尔泰山缘麦兹泥盆纪火山-沉积盆地成矿特点及其铅、铁、金找矿潜力分析[J]. 矿床地质, 26(1): 128-138.

何国琦,朱永峰. 2006. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究[J]. 中国地质, 33(3): 451-460.

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.

焦学军,马忠美,郭旭吉,张连昌. 2005. 阿尔泰山南缘克兰盆地泥盆纪火山沉积与矿产[J]. 西北地质, 38(3): 21-28.

李华芹,陈富文. 2004. 中国新疆区域成矿作用年代学[M]. 北京:地质出版社, 1-365.

李锦铁. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. 地质论评, 50(3): 304-322.

李思强,马忠美,郭旭吉. 2006. 阿勒泰复向斜的成矿环境及其矿产[J]. 矿产与地质, 20(2): 116-121.

刘 锋,杨富全,毛景文,柴凤梅,耿新霞,郭正林. 2009. 阿尔泰山带阿巴官花岗岩体年代学及地球化学研究[J]. 岩石学报, 25(6): 1416-1425.

刘 敏,张作衡,王永强,郭旭吉. 2008. 新疆阿尔泰山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, 82(11): 1504-1513.

刘 敏,张作衡,王永强,郭旭吉,陈伟十. 2009. 新疆阿尔泰山大东沟铅锌矿床流体包裹体特征及成矿作用[J]. 矿床地质, 28(3): 282-296.

龙晓平,袁 超,孙 敏,肖文交,林寿发,王毓婧,蔡克大. 2008. 北疆阿尔泰山缘泥盆系浅变质碎屑沉积岩地球化学特征及其形成环境[J]. 岩石学报, 24(4): 718-732.

毛景文, Pirajno Franco, 张作衡,柴凤梅,杨建民,吴 华,陈世平,程松林,张长青. 2006. 天山-阿尔泰山东部地区海西晚期后碰撞铜镍硫化物矿床: 主要特点及可能与地幔柱的关系[J]. 地质学报, 80(7): 925-942.

牛贺才,于学元,许继峰,单 强,陈繁荣,张海洋,郑作平. 2006. 中国新疆阿尔泰山晚古生代火山作用及成矿[M]. 北京:地质出版社, 1-184.

单 强,曾乔松,罗 勇,杨武斌,张 红,裘瑜卓,于学元. 2011. 新疆阿尔泰山康布铁堡组钾质和钠质流纹岩的成因及同位素年代学研究[J]. 岩石学报, 27(12): 3653-3665.

宋 彪,张玉海,万渝生,简 平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(增): 26-30.

涂光炽. 1999. 初议中亚成矿域[J]. 地质科学, 34(4): 397-404.

王登红,陈毓川,徐志刚,李天德,傅旭杰. 2002. 阿尔泰山成矿省的

- 成矿系列及成矿规律[M]. 北京:原子能出版社, 1-493.
- 王京彬. 1998. 新疆可可塔勒铅锌成矿带成矿规律[J]. 新疆地质, 16(3):236-244.
- 王涛, 洪大卫, 董英, 韩宝福, 石玉若. 2005. 中国阿尔泰山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, 21(3):640-650.
- 王向阳. 2009. 新疆阿勒泰地区克兰盆地构造特征[J]. 新疆有色金属, 32(3):29-31.
- 王中刚, 赵振华, 邹天人. 1998. 阿尔泰山花岗岩类地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1-152.
- 吴志亮. 1992. 新疆阿尔泰山南缘早泥盆世火山——沉积建造及其穿时性[J]. 昆明工学院学报, 17(6):1-10.
- 吴志亮, 李峰. 1996. 热水沉积成岩成矿作用——以阿尔泰山泥盆纪火山盆地为例[M]. 北京:地质出版社, 1-210.
- 徐九华, 林龙华, 王琳琳, 褚海霞, 卫晓峰, 陈栋梁. 2009. 阿尔泰山克兰盆地 VMS 矿床的变形变质与碳质流体特征[J]. 矿床地质, 28(5):585-598.
- 杨富全, 毛景文, 郑建民, 徐林刚, 刘德权, 赵财胜, 叶会寿. 2006. 哈萨克斯坦阿尔泰山巨型成矿带的地质特征和成矿模型[J]. 地质学报, 80(7):963-983.
- 杨富全, 刘锋, 柴凤梅, 张志欣, 耿新霞, 吕书君, 姜丽萍, 欧阳刘进. 2011. 新疆阿尔泰山铁矿地质特征、时空分布及成矿作用[J]. 矿床地质, 30(4):575-598.
- 于学元, 梅厚钧, 杨学昌, 王俊达. 1993. 额尔齐斯火山岩及构造演化. 涂光炽主编. 新疆北部固体地球科学发展[M]. 北京:科学出版社, 1-194.
- 张进红, 王京彬, 丁汝福. 2000. 阿尔泰山造山带康布铁堡组变质火山岩锆石特征和铀、铅年龄[J]. 中国区域地质, 19(3):281-287.
- 张忠利. 2011. 新疆阿尔泰山大东沟铅锌矿床地质特征及成矿机制初探[J]. 新疆有色金属 增刊, 45-18.
- 张作衡, 王志良, 王彦斌, 左国朝, 王龙生, 吕林素. 2007. 新疆西天山菁布拉克基性杂岩体闪长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 26(4):353-360.
- Berzin N A, Coleman R G, Dobretsov N L, Zonenshain L P, Xiao X and Chang E Z. 1994. Geodynamic map of the western of the Paleo-Asina Ocean[J]. Russian Geology and Geophysics, 35:2-22.
- Campston W, Williams I S and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar braccia using a sensitive high mass-resolution in microprobe[J]. J. Geophys. Res., 89:525-534.
- Chai F M, Mao J W, Dong L H, Yang F Q, Liu F, Geng X X and Zhang Z X. 2009. Geochronology of metarhyolites from the Kangbutiebao Formation in the Kelang basin, Altay Mountains, Xinjiang: Implications for the tectonic evolution and metallogeny[J]. Gondwana Research, 16:190-200.
- Daukeev S Z H, Uzhkenov B S, Bespaev K H A, Miroshnichenko L A, Mazurov A K and Saydukasov M A. 2004. Atlas of mineral deposit models of the republic of Kazakhstan[M]. Almaty: Printing House "Center for geoinformation of the Military Forces of the Republic of Kazakhstan". 1-141.
- Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, Bleeker W and Lourens L. 2004. A new Geological Time Scale. with special reference to Precambrian and Neogen[J]. Episodes, 27(2):83-100.
- Li J Y, Xiao W J, Wang K Z, Sun G H and Gao L M. 2003. Neoproterozoic-Paleozoic tectonic stratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China[A]. In: Mao J W, Goldfarb R J, Seltman R, et al., Tectonic evolution and metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan[C]. LAGOD Guidebook series 10: CERCAMS/NHM, London, 31-74.
- Liu Y S, Hu Z C, Gunther D, Xu J, Gao C H and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257:34-43.
- Ludwig K R. 2001. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2. 49[M]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 1-56.
- Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N and Whitehouse M J. 2008. Plesovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 249:1-35.
- Rutatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 184:123-138.
- Sengor A M C and Natalin B A. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments and synthesis[A]. In: Yin A, Harrison M, eds. The tectonic evolution of Asia[C]. Cambridge University Press, 486-640.
- Wang T, Hong D W, Jahn B M, Tong Y, Wang Y B, Han B F and Wang X X. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. The Journal of Geology, 114, 735-751.
- Windley B F, Kroener A, Guo J, Qu G, Li Y and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. Journal of Geology, 110(6):719-737.
- Williams I S. 1992. Some observations on the use of zircon U-Pb geochronology in the study of granitic rocks[J]. Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci., 83:447-458.
- Xiao W J, Huang B C, Han C M, Sun S and Li J L. 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogen[J]. Gondwana Research, 18:253-273.
- Xu J F, Castillo P R, Chen F R, Niu H C, Yu X Y and Zhen Z P. 2003. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kurti area, Xinjiang, northwest China: Implications for backarc mantle evolution[J]. Chemical Geology, 193, 137-154.
- Zhu Y F, Zeng Y S and Gu L B. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No.3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 27:61-77.
- Zhu Y F. 2011. Zircon U-Pb and muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the gold-bearing Tianger mylonitized granite, Xinjiang, northwest China: Implications for radiometric dating of mylonitized magmatic rocks[J]. Ore Geology Reviews, 40:108-121.