

文章编号: 0258-7106(2012)02-0255-16

河北省四拨子-六拨子钼铜矿区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿意义*

李 强¹ 孟祥元² 武 峰² 杨富全^{1**} 刘 锋¹ 张志欣^{1,3}

(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开放实验室, 北京 100037;

2 河北省地质矿产局第五地质大队, 河北 唐山 063004; 3 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 河北省青龙满族自治县四拨子-六拨子钼铜矿位于燕辽成矿带东部, 是近年来发现的中型钼铜矿床。矿化多沿层面、裂隙充填、交代, 呈脉状赋存于大红峪组的石英砂岩、长石石英砂岩及白云岩夹层和高于庄组的白云岩内, 地质特征表明成矿主要与硅化关系密切。文章对矿区 6 个侵入岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究, 结果表明, 矿区存在 4 期岩浆侵入活动: 第一期为晚三叠世(211~206 Ma), 形成六柱坪和三拨子西沟细粒似斑状二长花岗岩; 第二期为早侏罗世早期(196~190 Ma), 形成老商家和五拨子花岗斑岩; 第三期为早侏罗世晚期(177 Ma), 形成达子沟细粒似斑状二长花岗岩; 第四期为晚侏罗世早期(160 Ma), 形成七拨子粗中粒二长花岗岩。矿区辉钼矿的 Re-Os 加权平均年龄为(194±1) Ma, 成矿时代为早侏罗世, 与花岗斑岩形成时代一致(196~190 Ma), 表明钼铜成矿可能与花岗斑岩岩浆期后热液活动有关。

关键词 地球化学 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年 侵入岩 钼铜矿 四拨子-六拨子 青龙县

中图分类号: P618.65; P618.42

文献标志码: A

LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of intrusive rocks and its metallogenic significance in Siboozi-Liubozi molybdenum-copper deposit of Qinglong County, Hebei Province

LI Qiang¹, MENG XiangYuan², WU Feng², YANG FuQuan¹, LIU Feng¹ and ZHANG ZhiXin¹

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 No.5 Geological Party of Hebei Bureau of Geology, Tangshan 063004, Hebei, China; 3 Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract

Located in eastern Yanliao metallogenic belt, the Siboozi-Liubozi molybdenum-copper deposit in Qinglong County is a newly-discovered medium-sized molybdenum-copper deposit. Mineralization mainly appears in metasomatic and filling forms along bedded planes and fractures, and occurs as veins in quartz sandstone, feldspar-quartz sandstone, and dolomite intercalations in Dahongyu Formation and dolomite in Gaoyuzhuang Formation. Geological features indicate that molybdenite is closely related to silicification. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of six intrusive rocks of the ore deposit was studied in this paper, and the result suggests that there existed four

* 本文为资源补偿费项目(编号:200702)资助成果

第一作者简介 李 强,男,1987 年生,硕士研究生,矿床学专业。Email:liqiang200620062@yahoo.com.cn

** 通讯作者 杨富全,男,1968 年生,博士,研究员,从事矿床地质、地球化学研究。Email:fuquanyang@163.com

收稿日期 2011-05-18;改回日期 2011-12-20。张绮玲编辑。

stages of magmatic intrusion in the ore deposit: the first stage is the late Triassic(211~206 Ma), in which fine-grained porphyreous monzogranite formed in Liuzhuping and Xigou of Sanbozi; the second stage is the earliest Jurassic(196~190 Ma), in which granite-porphyry formed in Laoshangjia and Wubozhi; the third stage is the late early Jurassic(177 Ma), in which fine-grained porphyreous monzogranite was produced in Dazigou; the fourth stage is the early late Jurassic(160 Ma), in which coarse-medium-grained monzogranite came into being in Qibozi. Re-Os weighted mean age of molybdenite from the ore deposit is (194 ± 1) Ma, which is in accord with the age of the granite-porphyry(196~190 Ma), suggesting that the metallogenic epoch is early Jurassic and that Mo-Cu metallogenesis is probably related to late granite-porphyry magmatic-hydrothermal activity.

Key words: geochemistry, zircon LA-ICP-MS U-Pb dating, intrusive rocks, molybdenum-copper deposit, Sibozhi-Liubozhi, Qinglong County

燕辽钼矿带处于华北板块与西伯利亚板块、太平洋板块的接合部位(图1),是继东秦岭钼矿带之后,中国第二大钼矿带(代军治,2008)。中生代以来,华北板块进入了陆内造山阶段,构造岩浆活动广泛,与之相伴形成了以钼为主的各种金属矿产(芮宗瑶等,1994;裴荣富等,1998),成为中国重要的金属成矿带之一。该带内目前已发现杨家杖子钼矿(大

型)、兰家沟钼矿(大型)、撒岱沟门钼矿(大型)等钼(铜)矿床(点)20余处。许多学者(董得茂等,1985;黄典豪等,1996;章百明等,1996;毛景文等,2005;代军治,2008;代军治等,2007a;2007b;2008;段焕春等,2007;张遵忠等,2009;曾庆栋等,2009;杜保峰等,2010)对该成矿带中矿床地质特征、岩浆作用、成矿时代及区域成矿规律等进行了大量研究,并取得了

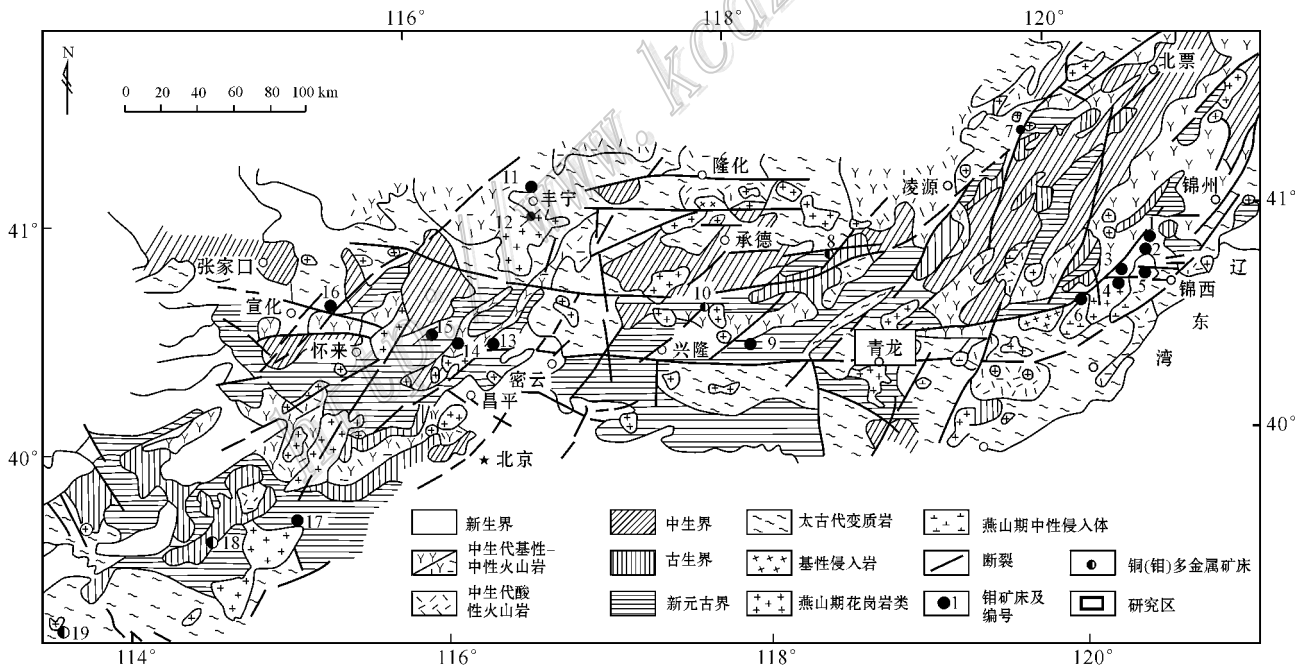


图1 华北板块北缘燕辽钼(铜)成矿带地质略图(据黄典豪等,1996修改)

主要矿床:1—钢屯;2—兰家沟;3—新台门;4—松北;5—杨家杖子;6—老虎沟;7—肖家营子;8—小寺沟;9—莫古峪;10—寿王坟;11—撒岱沟门;12—大草坪;13—石湖峪;14—东三岔;15—大庄科;16—贾家营;17—野狐;18—大湾;19—后峪

Fig. 1 Schematic geological map of the Yanliao molybdenum metallogenic belt on the northern margin of North China plate (modified after Huang et al., 1996)

Major deposits: 1—Gangtun; 2—Lanjiagou; 3—Xintaimen; 4—Songbei; 5—Yangjiazhangzi; 6—Laohugou; 7—Xiaojiayingzi; 8—Xiaosigou; 9—Moguyu; 10—Shouwangfen; 11—Sadaigoumen; 12—Dacaoping; 13—Shihuyu; 14—Dongsancha; 15—Dazhuangke; 16—Jiajiaying; 17—Yehu; 18—Dawan; 19—Houyu

丰硕的成果。河北省青龙满族自治县四拨子-六拨子钼铜矿位于燕辽成矿带东部,目前矿区已经圈定了60条钼矿体,展现出良好的找矿前景。由于该钼矿是新近发现的,目前还缺乏系统研究,所以其成因类型、成矿时代和成矿作用等尚不明确。本文通过对矿床地质特征的系统研究,认为该钼铜矿床的形成与热液活动关系密切。在野外调研和室内镜下观察的基础上,对矿区6个侵入岩体开展了系统的LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,以期探讨岩浆作用与钼成矿的关系,限定矿床形成时代,同时为深入研究燕辽成矿带的构造演化与成矿事件提供新的依据。

1 成矿地质背景

四拨子-六拨子钼铜矿床位于河北省青龙满族自治县县城西南约30 km处,燕辽成矿带东部,所处大地构造位置为华北板块北缘燕山造山带(河北省地质矿产局,1989)^①。区域出露地层主要为太古界迁西群、单塔子群,中-上元古界长城系、蓟县系、青白口系,古生界寒武系,中生界髫髻山组、后城组及新生界第四系(图2)。其中,中元古界长城系高于庄组以碳酸盐岩为主,岩性为燧石结核、燧石条带白云岩、泥晶白云岩、含燧石泥质白云岩、白云岩、大理岩化白云岩及含锰砂岩、粉砂岩。大红峪组为一套碎屑岩,岩性为石英砂岩、长石石英砂岩、长英质粗砾岩、含砂白云岩、粉砂岩及少量砂质白云岩。

区域褶皱和断裂较发育,褶皱主要有凉水河-三拨子北西向开阔式向斜、七拨子-五道河子北西向大型开阔复向斜及六拨子穹窿和六柱坪穹窿。断裂以北西向和北东向为主。

区域内燕山期岩浆活动强烈而频繁,侵入岩发育。东部的肖营子岩体为燕山期侵入岩,总体呈南北向,岩性主要为斑状花岗岩、中细粒花岗岩、石英斑岩等。后期侵入的杂岩体多出露于肖营子岩体的西部,如大东沟、六柱坪、六拨子花岗岩体、采桑峪、四拨子西沟等花岗斑岩体,黄砬沟花岗岩、五道沟花岗斑岩、七拨子花岗岩、凉水河花岗闪长岩多呈岩株产出(图2)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地层

矿区出露地层主要为中元古界长城系高于庄组及大红峪组(图3),其次为迁西群。高于庄组以碳酸盐岩为主,自下而上划分为3段(矿区内未见高于庄组四段出露)。第一段岩性组合为燧石结核、燧石条带白云岩及泥晶白云岩。第二段岩性组合为含锰砂岩及粉砂岩。第三段岩性组合为中薄层含燧石泥质白云岩、白云岩及大理岩化白云岩。大红峪组以碎屑岩为主,自下而上可划分为二段。第一段岩性主要为石英砂岩。第二段岩性为互层状细砂岩与粉砂岩。迁西群出露于矿区西南部二拨子背斜核部及四拨子西沟,岩性为角闪斜长片麻岩。

2.2 构造及侵入岩

矿区断裂构造发育,主要为冷口断裂的次一级断裂,性质以压扭性为主,走向多为北西向。共有11条断层,根据其其与矿体关系可划分为3期:第一期为成矿前断裂,分布在矿区南部,走向北西,与矿体关系不大(如 F_1)。第二期成矿期断裂,包括导矿断裂和容矿断裂,导矿断裂主要为北西向的 F_4 及 F_5 ,与区域构造线方向一致,以逆断层为主,倾向主要为南西向,破碎带内见有方铅矿化、闪锌矿化,而 F_4 、 F_6 派生的裂隙为容矿断裂。第三期为成矿后断裂,如 F_{11} 错断矿体。褶皱主要为三拨子倒转向斜、四拨子背斜、六拨子穹窿等^①。

矿区酸性侵入岩发育,分布于矿区的东、西、北部,呈岩株、岩墙及岩脉状侵入于长城系中,岩性主要为粗中粒二长花岗岩、似斑状二长花岗岩和花岗斑岩等(见下文样品描述)。

2.3 矿化特征及围岩蚀变

四拨子-六拨子钼铜矿区含矿带长度2 000余米,宽100余米,目前已圈定了60条钼矿体。赋矿地层为大红峪组的石英砂岩、长石石英砂岩及白云岩夹层与高于庄组的白云岩。铜矿化主要出现在地表,钼矿化出现在深部。辉钼矿不均匀分布,相对富集地段构成钼矿体,矿体与围岩呈渐变过渡关系。辉钼矿化主要产于砂岩裂隙中,白云岩中也有少量

① 河北省地矿局第五地质大队. 2008. 河北省青龙满族自治县四拨子-六拨子铜多金属矿普查地质报告.

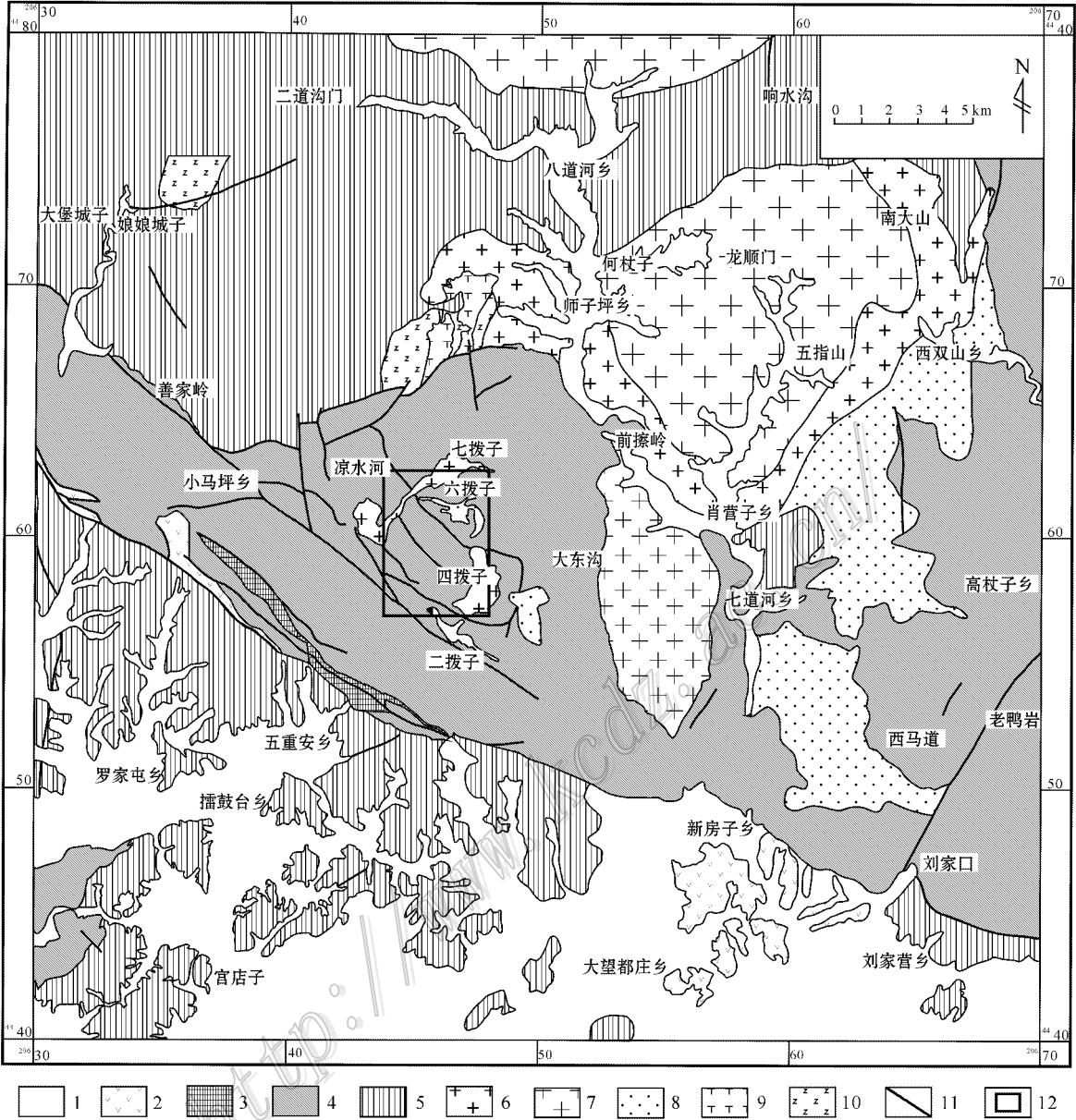


图 2 四拨子-六拨子钼铜矿区域地质略图(据河北省地矿局第五地质大队,2008 修改^①)

1—第四系砂砾;2—侏罗系火山岩;3—寒武系沉积岩;4—元古界沉积岩;5—太古界变质岩;6—花岗岩;7—斑状花岗岩;
8—石英斑岩;9—正长斑岩;10—闪长岩;11—断层;12—图 3 位置

Fig. 2 Regional geological map of Sibozhi-Liubozhi Mo-Cu deposit

(modified after No. 5 Geological Party of Hebei Bureau of Geology 2008)

1—Quaternary gravel;2—Jurassic volcanic rocks;3—Cambrian sedimentary rocks;4—Proterozoic sedimentary rocks;5—Archaean metamorphic rocks;6—Granite;7—Porphyritic granite;8—Quartz porphyry;9—Syenite porphyry;10—Diorite;11—Fault;12—Fig. 3

分布。钼矿化主要有 4 种类型,辉钼矿石英脉、辉钼矿石英细脉、辉钼矿网脉和辉钼矿薄膜。网脉状产出的辉钼矿脉往往是辉钼矿的富集地段,辉钼矿可以伴随硅化形成含辉钼矿石英脉,该矿化类型最为

常见,可以沿裂隙构造直接充填成辉钼矿脉体或薄膜,也可沿围岩蚀变较发育的构造附近分布呈细脉状。钼矿体在深部呈盲矿体存在,矿脉总体产状为走向北西,倾向南西,倾角变化在 30~50°间,局部产

① 河北省地矿局第五地质大队. 2008. 河北省青龙满族自治县四拨子-六拨子铜多金属矿普查地质报告.

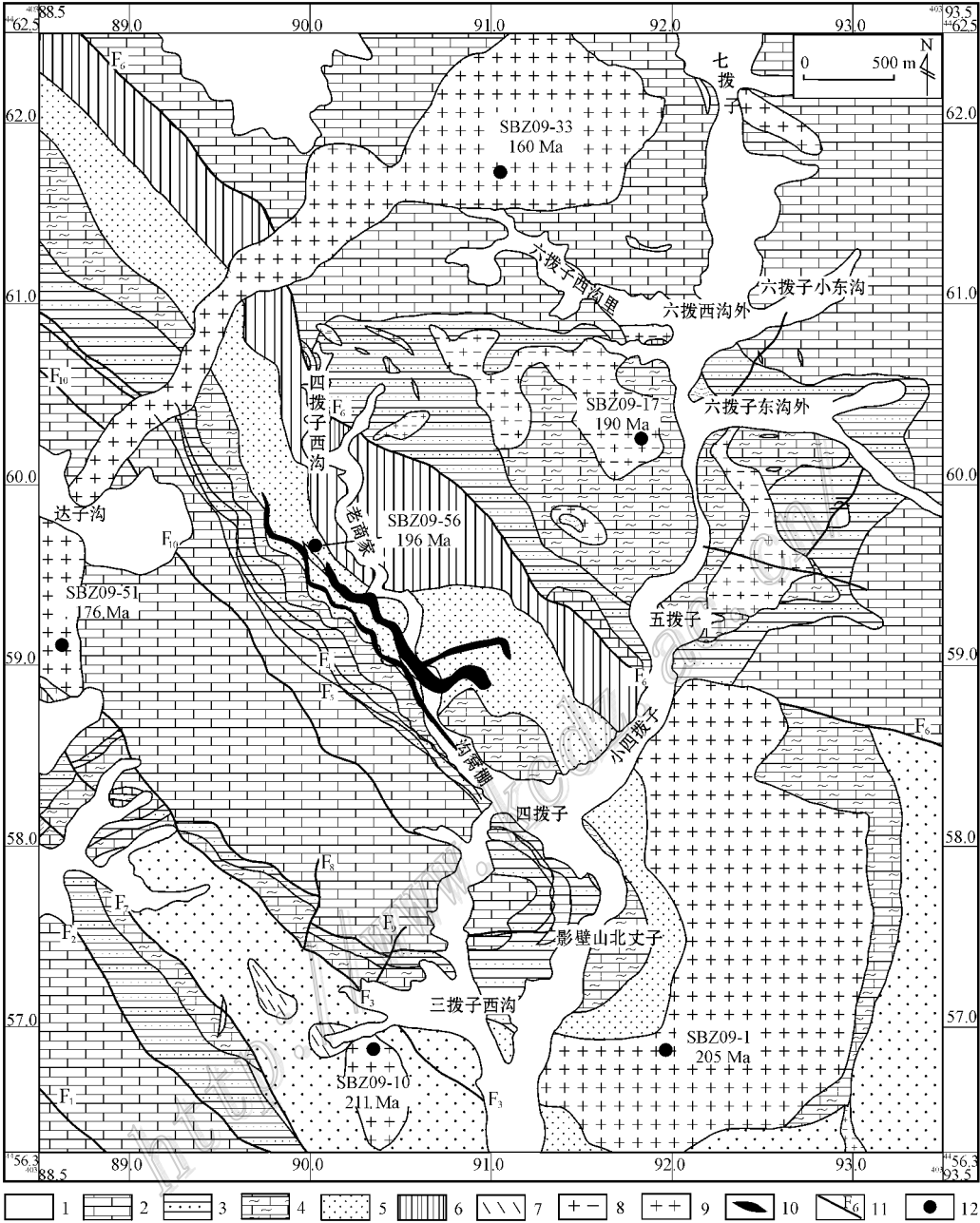


图 3 四拨子-六拨子钼铜矿矿区地质略图(据河北省地矿局第五地质大队 2008 修改^①)

1—第四系洪积物；2—长城系高于庄组三段大理岩化白云岩、含燧石泥质白云岩、白云岩；3—长城系高于庄组二段含锰砂岩、粉砂岩互层；4—长城系高于庄组一段燧石结核、燧石条带白云岩、泥晶白云岩；5—长城系大红峪组二段细砂岩、粉砂岩；6—长城系大红峪组一段石英砂岩；7—迁西群角闪斜长片麻岩；8—花岗斑岩；9—二长花岗岩；10—矿化范围；11—断层及编号；12—采样位置

Fig. 3 Geological map of the Sibozhi-Liubozi Mo-Cu deposit
(modified after No. 5 Geological Party of Hebei Bureau of Geology 2008)

1—Quaternary proluvium；2—Marblized dolomite, argillaceous dolomite with chert and dolomite of 3rd Member of Gaoyuzhuang Formation, Changcheng System；3—Mn-bearing sandstone and siltstone of 2nd Member of Gaoyuzhuang Formation, Changcheng System；4—Dolomite with nodular chert, zebra dolomite and dolomicrite of 1st Member of Gaoyuzhuang Formation, Changcheng System；5—Fine sandstone and siltstone of 2nd Member of Dahongyu Formation, Changcheng System；6—Quartz sandstone of 1st Member of Dahongyu Formation, Changcheng System；7—Amphibole-plagioclase-gneisses of Qianxi Group；8—Granite-porphry；9—Monzogranite；10—Mineralization area；11—Fault and its number；12—Sampling location

① 河北省地矿局第五地质大队. 2008. 河北省青龙满族自治县四拨子-六拨子铜多金属矿普查地质报告.

状变化较大。单个钼矿体规模均较小,矿化带长约 1 000 m,厚度 1~6 m 不等,呈似层状体、透镜体和脉体,细脉厚度一般为 0.2~0.5 cm,个别厚达 2 cm,但粗大脉体矿化较弱。

矿石构造主要为浸染状、细(网)脉状、薄膜状,其次为角砾状、团块状构造(图 4)。矿石结构主要为粒状结构、半自形-他形粒状结构,少见鳞片-交代结构。矿石矿物以黄铁矿和辉钼矿为主,次为黄铜矿、磁铁矿,含少量磁黄铁矿、斑铜矿、方铅矿、闪锌矿等。脉石矿物主要为石英、透辉石、透闪石,少量绿泥石、绿帘石、方解石。已查明的平均品位: $w(\text{Mo})$ 为 0.1%, $w(\text{Cu})$ 为 1.2%^①。

围岩蚀变发育,主要为透辉石化、透闪石化、绿帘石化、硅化(图 4),其次是蛇纹石化、绿泥石化、碳酸盐化,少量钾长石化、角闪石化。绿帘石化最为普遍,透辉石化多呈面状、条带状分布,硅化、蛇纹石化

呈脉状。不同岩性中发育不同的蚀变,如白云岩中较发育蛇纹石化、透辉石化、硅化等,石英砂岩中发育透辉石化、绿帘石化、透闪石化、硅化及少量绿泥石化、碳酸盐化。钼矿化主要与硅化有关,常发育于矿脉的两侧。钼铜矿化发育于老商家岩体附近,地表岩体附近围岩蚀变发育,见褐铁矿化、孔雀石化。

3 样品及分析方法

3.1 样品

本次用于锆石测年的 6 件样品分别采自矿区不同岩体,其特征如下:

样品 SBZ09-1(118°44'13"E,40°14'34"N)采于六柱坪岩体,岩性为二长花岗岩,灰黄、浅黄白色,细粒似斑状结构,块状构造(图 5A)。岩石风化略强,从岩体内到与围岩接触带岩相变化表现出钾长石和黑

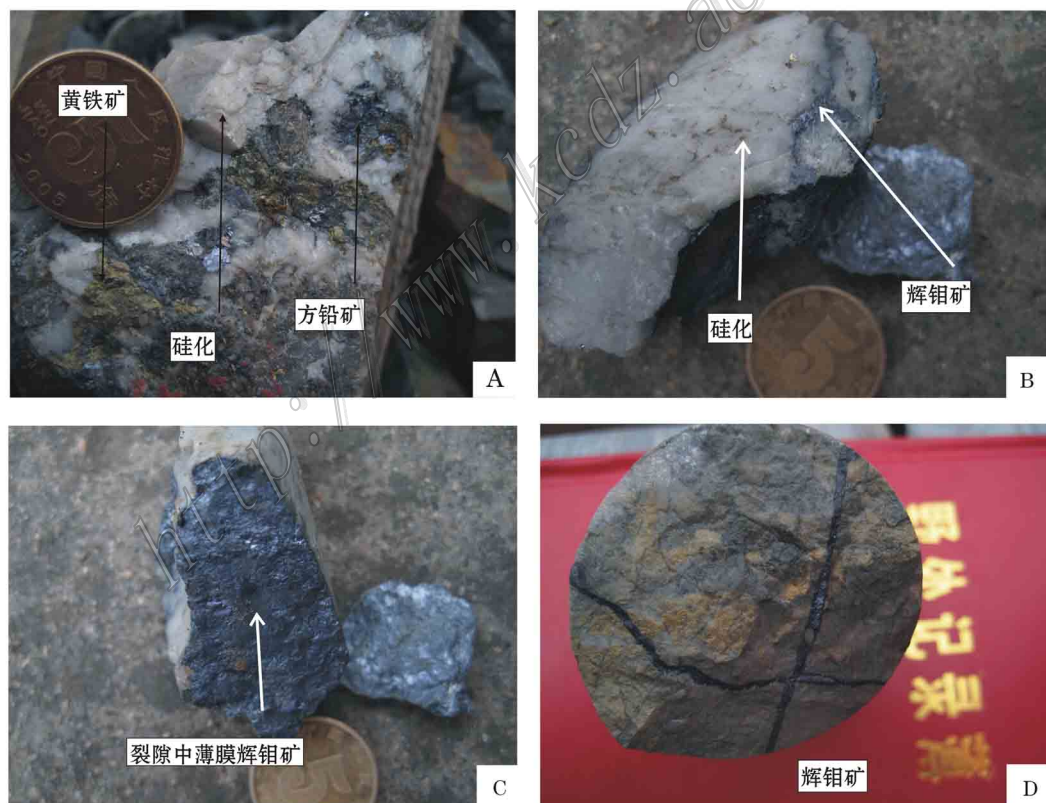


图 4 四拨子-六拨子钼铜矿床矿化特征

A. 石英中共生的黄铁矿和方铅矿; B. 辉钼矿与硅化密切相关; C. 裂隙中的薄膜状辉钼矿; D. 脉状辉钼矿

Fig. 4 Mineralization characteristics in the Sibozhi-Liubozhi molybdenum-copper deposit

A. Pyrite and galena association in quartz; B. Molybdenite closely related to silicification; C. Filmy molybdenite in fracture;

D. Molybdenite in vein

① 河北省地矿局第五地质大队. 2008. 河北省青龙满族自治县四拨子-六拨子铜多金属矿普查地质报告.

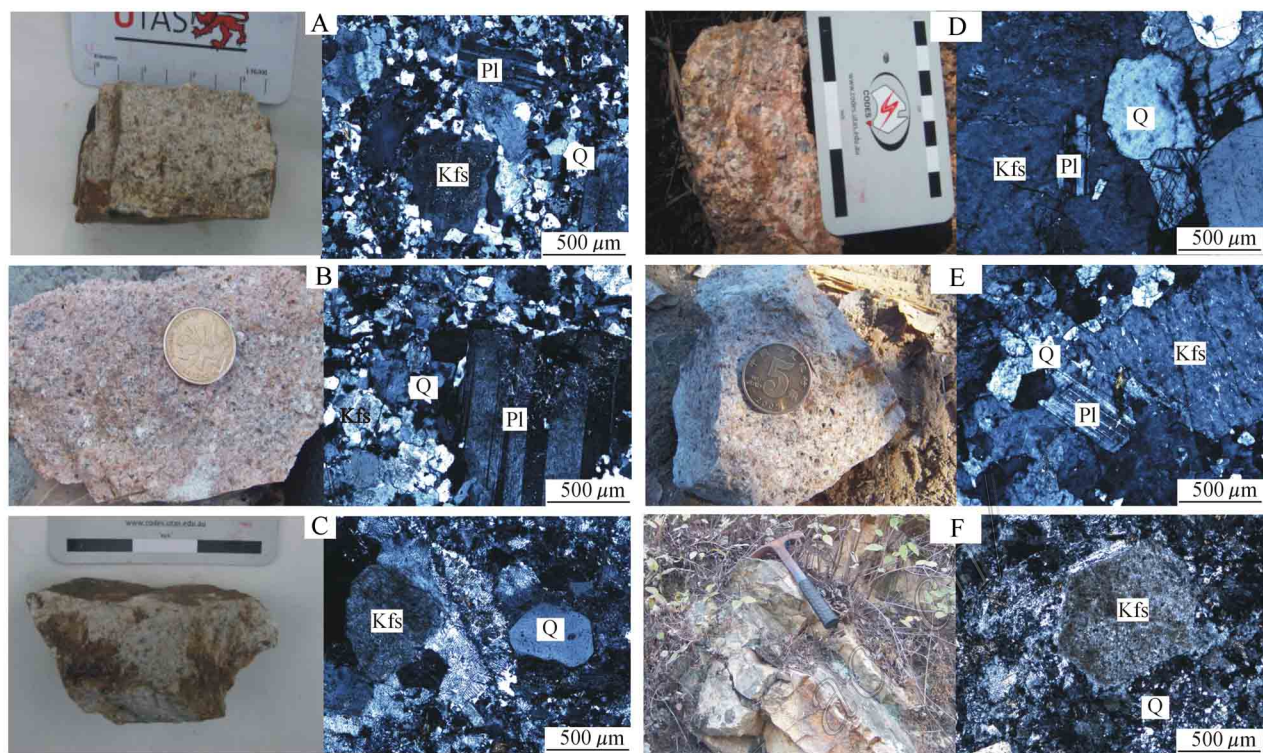


图 5 四拨子-六拨子钼铜矿区岩体特征

A. 六柱坪细粒似斑状二长花岗岩; B. 三拨子西沟细粒似斑状二长花岗岩; C. 五拨子花岗斑岩; D. 七拨子粗中粒二长花岗岩; E. 达子沟细粒似斑状二长花岗岩; F. 老商家花岗斑岩

Fig. 5 Characteristics of intrusive rocks in the Sibozhi-Liubozhi molybdenum-copper deposit

A. Liupingzhu fine-grained porphyreous monzogranite; B. Sanbozi Xigou fine-grained porphyreous monzogranite; C. Wubozhi granite porphyry; D. Qibozi coarse-medium-grained monzogranite; E. Dazigou fine-grained porphyreous monzogranite; F. Laoshangjia granite porphyry

云母含量略增加,斜长石含量略减少的变化,岩体与砂岩接触处多具同化混染现象,二者为侵入接触关系。斑晶由斜长石(15%~25%)、钾长石(10%~25%)、石英(3%~5%)及黑云母(2%)组成,粒度0.3~3 mm。基质主要由斜长石(5%~20%)、钾长石(20%~35%)、石英(20%~25%)、少量黑云母组成,粒径<0.2 mm(图 5A)。副矿物为磷灰石、锆石等。

样品 SBZ09-10(118°42′43″E, 40°14′20″N)采于三拨子西沟岩体,岩性为二长花岗岩,浅肉红色,细粒似斑状结构,块状构造(图 5B)。仅见几十平米的露头,周围均被覆盖。石英含量较高。斑晶由斜长石(5%)、钾长石(3%)、石英(1%)和黑云母(1%)组成,粒度0.5~3.8 mm。基质由斜长石(25%~30%)、钾长石(35%~40%)、石英(25%)及少量黑云母组成(图 5B)。副矿物为磷灰石、锆石等。

样品 SBZ09-17(118°43′28″E, 40°16′18″N)采于

五拨子岩体,岩性为花岗斑岩,样品风化面浅黄白色,新鲜面浅灰白色,斑状结构,块状构造(图 5C)。侵入体出露面积0.3 km²,近东西向展布,围岩主要为白云岩。岩体中有大量的围岩捕虏体和同化混染现象。围岩与侵入体接触部位可见5~6 m以硅化为主伴以少量砂卡岩化的接触变质带。斑晶为钾长石(5%~10%)和石英(5%~15%),粒度0.25~4.8 mm。基质由斜长石(5%~10%)、钾长石(45%~65%)、石英(20%)及少量黑云母组成,粒度0.025~0.25 mm(图 5C)。磷灰石、锆石为副矿物。

样品 SBZ09-33(118°43′04″E, 40°17′14″N)采于七拨子岩体,岩性为二长花岗岩,浅肉红色,粗中粒二长花岗结构,块状构造(图 5D)。围岩主要为高于庄组三段含燧石条带白云岩。侵入岩切穿围岩,呈侵入接触关系。岩体中有大量的围岩捕虏体和同化混染现象,围岩蚀变强烈,具透辉石化、透闪石化、硅

化、蛇纹石化等蚀变。岩石主由斜长石(40%~45%)钾长石(35%~40%)石英(20%)及少量黑云母组成。粒度一般2~5 mm,部分5~6.4 mm,部分0.1~2 mm(图5D)。副矿物为磷灰石和锆石。

样品 SBZ09-51(118°41'31"E 40°15'48"N)采于达子沟岩体,位于达子沟村南部村边,围岩主要为高于庄组三段含燧石条带白云岩。侵入岩切穿围岩,呈侵入接触关系。岩性为二长花岗岩,浅黄白色,细粒似斑状结构,块状构造(图5E)。斑晶为斜长石(5%~10%)钾长石(5%~10%)石英(1%~5%)和少量黑云母,粒度0.75~2.8 mm。基质由斜长石(20%~25%)钾长石(30%~40%)石英($\geq 20\%$)及少量黑云母组成,粒度0.05~0.7 mm(图5E)。副矿物为锆石。

样品 SBZ09-56(118°42'31"E 40°15'51"N)采于老商家岩体,呈北西向展布,出露面积很小,围岩主要为长城系大红峪组二段细砂岩、粉砂岩,围岩蚀变发育。岩性为花岗斑岩,样品风化面灰白色,新鲜面白色,斑状结构,块状构造(图5F)。斑晶由斜长石(5%~10%)钾长石(3%~8%)及石英(2%)组成,粒度0.4~2 mm。基质由斜长石(5%~10%)钾长石(55%~60%)石英(25%)及少量黑云母组成,粒度 < 0.2 mm(图5F)。

3.2 分析方法

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,样品靶的制备与 SHRIMP 定年锆石样品制备方法基本相同(宋彪等,2002)。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 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器,锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标,U、Th 含量以锆石 M127($\alpha(U)$ 923×10^{-6} , $\alpha(Th)$ 439×10^{-6} , Th/U 0.475, Slama et al., 2008)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 个锆石标样(2 个 GJ-1 和 1 个 Plesovice)进行校正。数据处理采用 ICPMADataCa 4.3 程序(Liu et al., 2008),测试过程中绝大多数分析点 $^{206}Pb/^{204}Pb > 1\ 000$,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 ,加权平均年龄具 95% 的置信度。详细实验测试过程可参见侯可军等(2009)文献。

3.3 分析结果

6 件样品中锆石颗粒在透射光下多为无色或浅黄褐色,颗粒自形程度较好,多呈短柱状、柱状,少数呈板状,长轴变化于 100~250 μm 之间,长短轴比变化于 1:1~2.5:1 之间。在阴极发光图像中,大多数锆石均发育较好的振荡环带结构(图6),显示了岩浆锆石的特点(Claesson et al., 2000; Belousova et al., 2002; Rubatto, 2002)。各岩体锆石 U-Pb 测年分析数据见表1,其测年结果分述如下:

(1) 六柱坪岩体(SBZ09-1)

样品 $w(U)$ 变化于 $(40.9 \sim 220.2) \times 10^{-6}$, $\alpha(Th)$ 为 $(46.7 \sim 644.1) \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.84~2.93。 $^{206}Pb/^{238}U$ 和 $^{207}Pb/^{235}U$ 谐和性较好, $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄为 201~208.2 Ma(表1)。14 个分析点都集中于谐和线及其附近很小的区域内(图7A),表明锆石在形成后 U-Pb 体系是封闭的,基本上没有 U 或 Pb 的丢失或加入(李瑞保等,2009)。由于 LA-ICP-MS 定年需要进行普通 Pb 的校正,对于时代小于 1 Ga 的用 $^{206}Pb/^{238}U$ 比较适合,因此该样品的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 (205.7 ± 0.8) Ma(MSWD=1.7),在误差范围内与谐和年龄一致,可代表六柱坪岩体的形成时代。

(2) 三拨子西沟岩体(SBZ09-10)

样品 $w(U)$ 变化于 $(22.7 \sim 321.3) \times 10^{-6}$, $\alpha(Th)$ 为 $(26.8 \sim 724.4) \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 1.18~2.52。 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄为 209.3~212.4 Ma(表1)。9 个分析点都集中于谐和线及其附近很小的区域内(图7B),获得 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 (211.1 ± 1.1) Ma(MSWD=0.51),在误差范围内该年龄与谐和年龄一致,可代表三拨子西沟岩体的形成时代。

(3) 五拨子岩体(SBZ09-17)

样品 $\alpha(U)$ 变化于 $(1\ 387.7 \sim 2\ 523.1) \times 10^{-6}$, $\alpha(Th)$ 为 $(1\ 336.8 \sim 4\ 134.8) \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.96~1.65。 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄为 188.8~191.4 Ma(表1)。10 个分析点都集中于谐和线的右侧(图7C), $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 (189.8 ± 0.7) Ma(MSWD=0.56),代表五拨子岩体的形成时代。

(4) 七拨子岩体(SBZ09-33)

样品 $\alpha(U)$ 变化于 $(1\ 475.7 \sim 6\ 495.1) \times 10^{-6}$,

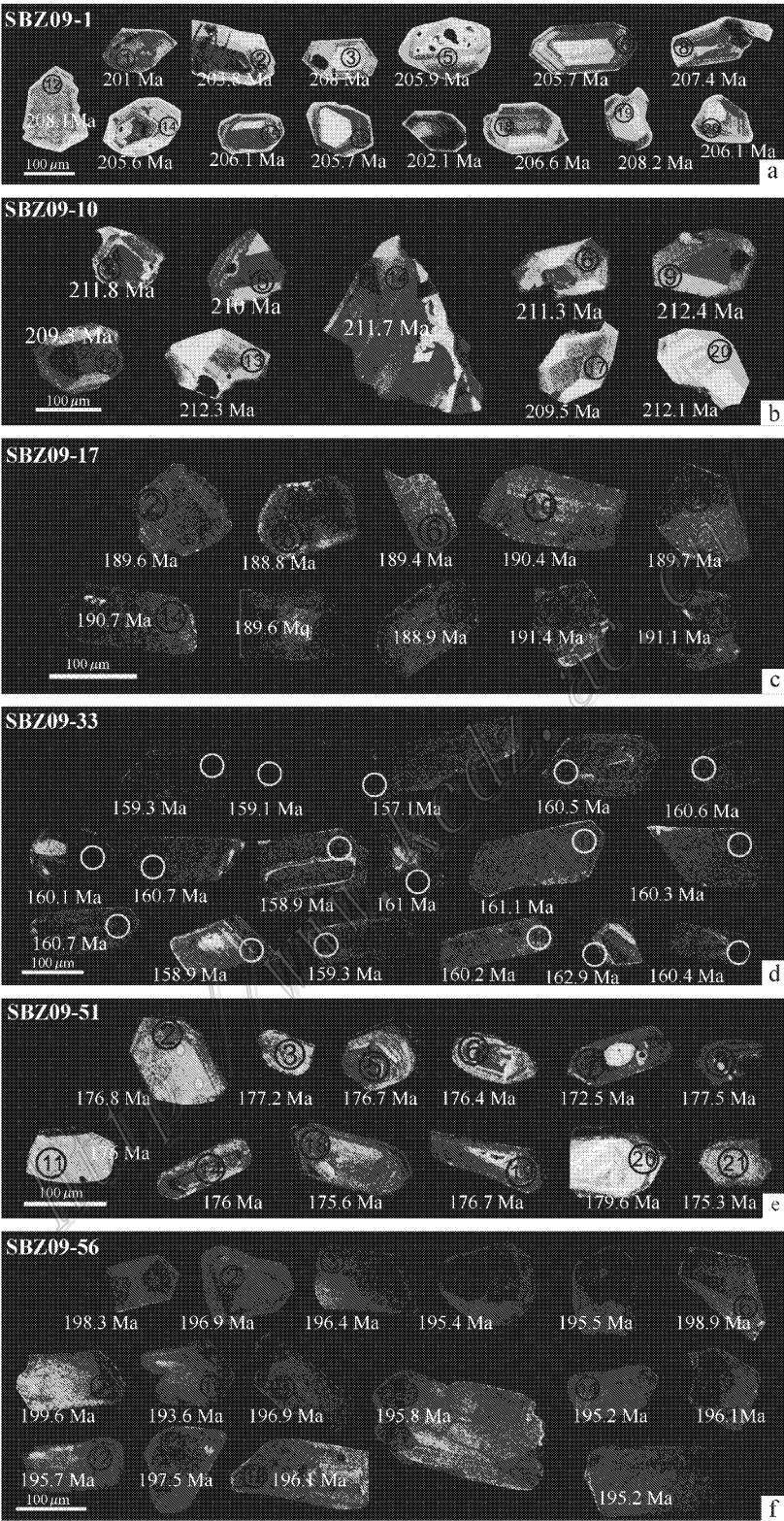


图 6 四拨子-六拨子钼铜矿区岩体代表性锆石阴极发光 (CL) 图像

a. 六柱坪岩体; b. 三拨子西沟岩体; c. 五拨子岩体; d. 七拨子岩体; e. 达子沟岩体; f. 老商家岩体

Fig. 6 CL images of representative zircons from intrusive rocks of the Sibozhi-Liubozhi molybdenum-copper deposit

a. Liuzhuping intrusive rock; b. Sanbozi Xigou intrusive rock; c. Wubozhi intrusive rock; d. Qibozhi intrusive rock; e. Dazigou intrusive rock; f. Laoshangjia intrusive rock

表 1 各岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of intrusive rocks

岩体及点号	$w(B)/10^{-6}$			同位素比值						表面年龄/Ma										
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/$	$^{206}\text{Pb}/$	$^{208}\text{Pb}/$	$^{232}\text{Th}/$	$^{207}\text{Pb}/$	$^{206}\text{Pb}/$	$^{207}\text{Pb}/$	^{235}U	$^{206}\text{Pb}/$	^{238}U	$^{208}\text{Pb}/$	^{232}Th					
				^{206}Pb	^{238}U	^{232}Th	^{238}U	^{235}U	^{238}U	^{232}Th	^{235}U	^{238}U	^{232}Th							
六柱坪岩体																				
sbz09-01-1	2.7	46.7	40.9	0.0497	0.0009	0.2166	0.0040	0.0317	0.0003	0.0051	0.0013	1.14	189.0	40.7	199.1	3.3	201.0	1.8	102.0	25.6
sbz09-01-2	5.5	73.2	87.6	0.0510	0.0007	0.2245	0.0029	0.0321	0.0003	0.0035	0.0008	0.84	239.0	63.9	205.6	2.4	203.8	1.6	71.4	15.8
sbz09-01-3	5.1	118.5	71.1	0.0528	0.0023	0.2429	0.0158	0.0328	0.0002	0.0025	0.0005	1.67	320.4	100.0	220.8	12.9	208.0	1.5	50.5	9.8
sbz09-01-5	5.7	136.3	94.7	0.0516	0.0006	0.2294	0.0023	0.0325	0.0003	0.0027	0.0004	1.44	264.9	30.6	209.7	1.9	205.9	1.6	55.0	7.8
sbz09-01-6	9.7	189.1	92.5	0.0507	0.0006	0.2260	0.0025	0.0324	0.0002	0.0030	0.0004	2.05	227.8	27.8	206.9	2.0	205.7	1.1	60.4	7.2
sbz09-01-8	15.5	406.9	203.0	0.0515	0.0005	0.2324	0.0032	0.0327	0.0003	0.0023	0.0002	2.00	261.2	22.2	212.2	2.6	207.4	1.6	46.5	3.8
sbz09-01-12	4.9	130.0	64.3	0.0524	0.0012	0.2338	0.0045	0.0328	0.0003	0.0031	0.0002	2.02	305.6	51.8	213.3	3.7	208.1	1.9	63.6	4.9
sbz09-01-14	10.1	189.1	103.3	0.0499	0.0006	0.2227	0.0026	0.0324	0.0002	0.0027	0.0002	1.83	190.8	25.9	204.1	2.2	205.6	1.4	54.0	3.8
sbz09-01-15	4.3	82.0	64.0	0.0528	0.0009	0.2358	0.0035	0.0325	0.0002	0.0034	0.0003	1.28	320.4	41.7	215.0	2.9	206.1	1.3	67.8	6.1
sbz09-01-16	9.7	203.4	111.8	0.0504	0.0006	0.2246	0.0025	0.0324	0.0002	0.0026	0.0002	1.82	213.0	27.8	205.8	2.1	205.7	1.4	53.5	3.5
sbz09-01-17	21.2	644.1	220.2	0.0484	0.0003	0.2128	0.0017	0.0319	0.0002	0.0019	0.0001	2.93	120.5	49.1	195.9	1.4	202.1	1.0	37.6	1.7
sbz09-01-18	9.4	156.5	89.5	0.0511	0.0006	0.2284	0.0027	0.0326	0.0003	0.0024	0.0002	1.75	255.6	29.6	208.8	2.2	206.6	1.8	48.8	3.3
sbz09-01-19	6.1	76.1	67.2	0.0511	0.0008	0.2300	0.0032	0.0328	0.0003	0.0034	0.0003	1.13	255.6	33.3	210.2	2.6	208.2	1.8	68.1	6.0
sbz09-01-20	7.5	138.1	94.7	0.0506	0.0007	0.2255	0.0026	0.0325	0.0002	0.0023	0.0002	1.46	233.4	31.5	206.5	2.1	206.1	1.5	46.2	3.4
三拔子西沟岩体																				
sbz09-10-04	32.5	724.4	321.3	0.0558	0.0008	0.2572	0.0049	0.0334	0.0006	0.0026	0.0002	2.25	442.6	33.3	232.4	3.9	211.8	3.5	52.6	3.2
sbz09-10-05	14.6	405.1	165.9	0.0505	0.0004	0.2305	0.0020	0.0331	0.0002	0.0022	0.0001	2.44	216.7	18.5	210.6	1.7	210.0	1.4	44.4	2.3
sbz09-10-06	9.7	179.7	119.8	0.0511	0.0006	0.2336	0.0022	0.0333	0.0002	0.0028	0.0002	1.50	242.7	58.3	213.2	1.8	211.3	1.5	57.5	3.2
sbz09-10-09	4.1	26.8	22.7	0.0520	0.0011	0.2385	0.0048	0.0335	0.0003	0.0087	0.0009	1.18	287.1	48.1	217.2	4.0	212.4	2.1	174.7	17.3
sbz09-10-12	4.6	84.6	46.6	0.0519	0.0008	0.2354	0.0037	0.0330	0.0003	0.0034	0.0003	1.81	283.4	30.6	214.6	3.1	209.3	2.1	69.2	6.5
sbz09-10-13	7.6	134.4	63.6	0.0512	0.0008	0.2357	0.0034	0.0335	0.0003	0.0026	0.0002	2.11	250.1	33.3	214.9	2.8	212.3	1.6	53.2	3.6
sbz09-10-14	16.5	419.6	166.8	0.0511	0.0005	0.2343	0.0019	0.0334	0.0002	0.0023	0.0001	2.52	255.6	56.5	213.7	1.6	211.7	1.3	46.4	2.4
sbz09-10-17	9.3	220.0	108.6	0.0491	0.0005	0.2223	0.0021	0.0330	0.0002	0.0025	0.0002	2.03	150.1	25.9	203.8	1.7	209.5	1.5	49.8	3.1
sbz09-10-20	8.2	171.1	105.2	0.0514	0.0005	0.2359	0.0021	0.0335	0.0002	0.0026	0.0002	1.63	257.5	22.2	215.1	1.8	212.1	1.5	51.9	3.9

续表 1-1
Cont. Table 1-1

岩体及点号	$w(B)/10^{-6}$				同位素比值						表面年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
五拨子岩体																
sbz09-17-02	78.2	1769.4	1678.4		0.0509	0.0002	0.0013	0.0299	0.0002	0.0019	0.0001	1.05	239.0	5.6	193.3	1.1
sbz09-17-03	117.3	2876.6	2294.2		0.0519	0.0002	0.0014	0.0297	0.0002	0.0019	0.0001	1.25	283.4	12.0	196.0	1.1
sbz09-17-06	161.0	4134.8	2499.5		0.0524	0.0001	0.0013	0.0298	0.0002	0.0021	0.0001	1.65	301.9	7.4	198.1	1.1
sbz09-17-10	61.2	1336.8	1387.7		0.0506	0.0002	0.0016	0.0300	0.0002	0.0022	0.0001	0.96	233.4	7.4	193.0	1.4
sbz09-17-12	160.8	3900.0	2476.0		0.0514	0.0001	0.0013	0.0299	0.0002	0.0023	0.0001	1.58	261.2	5.6	195.2	1.1
sbz09-17-14	93.2	2132.4	1876.8		0.0504	0.0001	0.0013	0.0300	0.0002	0.0022	0.0001	1.14	216.7	5.6	192.6	1.1
sbz09-17-16	163.5	4043.5	2523.1		0.0527	0.0001	0.0013	0.0298	0.0002	0.0023	0.0001	1.60	322.3	5.6	199.3	1.1
sbz09-17-18	149.6	3645.1	2495.3		0.0534	0.0002	0.0014	0.0297	0.0001	0.0022	0.0001	1.46	346.4	4.6	201.3	1.2
sbz09-17-19	112.7	2624.5	2153.0		0.0517	0.0002	0.0014	0.0301	0.0002	0.0023	0.0001	1.22	272.3	7.4	197.7	1.2
sbz09-17-20	69.4	1525.9	1503.5		0.0510	0.0003	0.0016	0.0301	0.0002	0.0023	0.0001	1.01	239.0	13.0	194.7	1.4
七拨子岩体																
sbz09-33-02	67.7	1147.6	3349.4		0.0518	0.0002	0.0018	0.0250	0.0003	0.0021	0.0001	0.34	276.0	-25.0	166.8	1.5
sbz09-33-03	101.5	1419.5	5554.3		0.0550	0.0002	0.0014	0.0250	0.0002	0.0021	0.0001	0.26	413.0	7.4	176.2	1.2
sbz09-33-04	102.0	1851.9	4942.3		0.0572	0.0002	0.0014	0.0247	0.0002	0.0018	0.0001	0.37	498.2	2.8	180.3	1.2
sbz09-33-05	79.7	1413.6	3972.3		0.0537	0.0001	0.0013	0.0252	0.0002	0.0019	0.0001	0.36	366.7	5.6	173.6	1.1
sbz09-33-06	90.0	1284.8	4779.6		0.0544	0.0001	0.0014	0.0252	0.0002	0.0022	0.0001	0.27	390.8	5.6	176.0	1.2
sbz09-33-07	112.5	2118.6	5001.3		0.0556	0.0001	0.0013	0.0251	0.0002	0.0020	0.0001	0.42	438.9	5.6	178.9	1.1
sbz09-33-08	100.5	1548.2	5136.9		0.0550	0.0001	0.0012	0.0252	0.0002	0.0021	0.0001	0.30	413.0	5.6	177.7	1.0
sbz09-33-09	106.4	2502.0	4846.8		0.0571	0.0002	0.0012	0.0249	0.0001	0.0015	0.0001	0.52	494.5	7.4	182.1	1.0
sbz09-33-10	115.6	2121.2	5087.7		0.0541	0.0001	0.0011	0.0253	0.0002	0.0022	0.0001	0.42	376.0	7.4	175.4	0.9
sbz09-33-11	74.0	1437.7	2792.7		0.0558	0.0001	0.0016	0.0253	0.0002	0.0020	0.0001	0.51	455.6	5.6	180.9	1.3
sbz09-33-12	121.7	2107.1	5363.8		0.0579	0.0003	0.0015	0.0252	0.0001	0.0020	0.0001	0.39	524.1	41.7	186.3	1.2
sbz09-33-13	158.9	2848.7	6495.1		0.0590	0.0002	0.0013	0.0252	0.0002	0.0023	0.0001	0.44	564.9	2.8	189.4	1.1
sbz09-33-15	94.0	2036.5	3869.2		0.0542	0.0001	0.0008	0.0250	0.0001	0.0020	0.0001	0.53	388.9	5.6	173.8	0.7
sbz09-33-17	81.1	2188.0	3773.1		0.0558	0.0003	0.0010	0.0250	0.0002	0.0013	0.0001	0.58	455.6	11.1	178.5	0.9
sbz09-33-18	110.6	2261.3	5259.9		0.0545	0.0001	0.0012	0.0252	0.0002	0.0018	0.0001	0.43	390.8	3.7	175.9	1.0
sbz09-33-19	32.9	857.6	1475.7		0.0531	0.0004	0.0023	0.0256	0.0003	0.0016	0.0001	0.58	344.5	18.5	173.6	2.0
sbz09-33-20	118.2	2191.6	5370.3		0.0544	0.0001	0.0010	0.0252	0.0001	0.0021	0.0001	0.41	387.1	0.9	175.8	0.8

续表 1-2

岩体及点号	$w(B)/10^{-6}$			同位素比值				表面年龄/Ma													
	Pb	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ									
达子沟岩体	sbz09-51-02	35.3	650.6	1057.8	0.0490	0.0002	0.1878	0.0024	0.0278	0.0004	0.0020	0.0001	0.62	146.4	-16.7	174.8	2.1	176.8	2.3	41.3	2.1
	sbz09-51-03	26.6	384.5	755.5	0.0508	0.0003	0.1946	0.0021	0.0279	0.0003	0.0022	0.0001	0.51	231.6	13.0	180.5	1.7	177.2	2.0	44.5	2.6
	sbz09-51-05	42.3	887.9	1269.1	0.0495	0.0002	0.1898	0.0025	0.0278	0.0004	0.0020	0.0001	0.70	172.3	12.0	176.4	2.1	176.7	2.2	40.1	1.9
	sbz09-51-06	37.3	707.6	1229.0	0.0518	0.0002	0.1983	0.0027	0.0277	0.0004	0.0019	0.0001	0.58	276.0	-25.0	183.7	2.2	176.4	2.3	39.2	2.2
	sbz09-51-07	9.5	149.3	269.4	0.0516	0.0010	0.1951	0.0052	0.0271	0.0004	0.0019	0.0003	0.55	264.9	44.4	179.3	4.4	172.5	2.8	38.7	6.4
	sbz09-51-08	38.4	644.5	1038.7	0.0524	0.0003	0.2013	0.0025	0.0279	0.0004	0.0023	0.0001	0.62	305.6	8.3	186.2	2.1	177.5	2.4	47.1	2.8
	sbz09-51-11	15.4	187.7	532.8	0.0505	0.0005	0.1925	0.0032	0.0277	0.0005	0.0028	0.0003	0.35	216.7	24.1	178.8	2.7	176.0	3.0	56.3	5.7
	sbz09-51-14	31.0	464.5	979.0	0.0509	0.0002	0.1942	0.0013	0.0277	0.0002	0.0020	0.0001	0.47	239.0	11.1	180.2	1.1	176.0	1.3	41.3	2.3
	sbz09-51-18	33.9	674.4	1041.7	0.0491	0.0002	0.1869	0.0014	0.0276	0.0002	0.0020	0.0001	0.65	150.1	12.0	174.0	1.2	175.6	1.3	40.6	2.0
	sbz09-51-19	14.6	150.5	349.5	0.0484	0.0003	0.1853	0.0014	0.0278	0.0002	0.0027	0.0002	0.43	120.5	13.0	172.6	1.2	176.7	1.3	54.5	3.8
老商家岩体	sbz09-51-20	17.4	215.3	294.7	0.0524	0.0006	0.2035	0.0017	0.0283	0.0002	0.0024	0.0002	0.73	301.9	24.1	188.1	1.4	179.6	1.3	48.5	3.4
	sbz09-51-21	51.0	756.4	1612.1	0.0505	0.0005	0.1924	0.0027	0.0276	0.0002	0.0023	0.0001	0.47	216.7	22.2	178.7	2.3	175.3	1.2	45.7	2.7
	sbz09-56-01	92.1	2232.7	1057.1	0.0522	0.0003	0.2250	0.0018	0.0312	0.0002	0.0025	0.0001	2.11	294.5	11.1	206.0	1.5	198.3	1.4	50.9	2.9
	sbz09-56-02	37.4	756.6	789.8	0.0500	0.0003	0.2133	0.0017	0.0310	0.0003	0.0025	0.0001	0.96	194.5	16.7	196.3	1.4	196.9	1.6	50.4	2.8
	sbz09-56-03	28.4	569.1	562.5	0.0499	0.0004	0.2128	0.0020	0.0309	0.0002	0.0026	0.0001	1.01	190.8	20.4	195.9	1.7	196.4	1.5	52.7	2.9
	sbz09-56-04	149.4	3970.5	1662.3	0.0496	0.0002	0.2106	0.0017	0.0308	0.0003	0.0025	0.0001	2.39	176.0	7.4	194.0	1.4	195.4	1.6	50.2	2.4
	sbz09-56-05	143.3	3759.3	1714.3	0.0497	0.0002	0.2110	0.0019	0.0308	0.0003	0.0025	0.0001	2.19	189.0	7.4	194.4	1.6	195.5	1.8	51.1	2.5
	sbz09-56-06	26.6	529.7	574.6	0.0508	0.0006	0.2185	0.0023	0.0313	0.0003	0.0027	0.0001	0.92	235.3	27.8	200.7	1.9	198.9	1.8	53.8	2.9
	sbz09-56-07	99.5	2452.3	1392.5	0.0506	0.0003	0.2191	0.0021	0.0314	0.0003	0.0026	0.0001	1.76	220.4	13.0	201.2	1.7	199.6	1.9	52.9	2.7
	sbz09-56-09	161.4	4156.7	1853.9	0.0512	0.0002	0.2192	0.0022	0.0310	0.0003	0.0026	0.0001	2.24	250.1	7.4	201.2	1.8	196.9	2.0	53.3	3.0
sbz09-56-10	123.8	3161.0	1536.8	0.0500	0.0003	0.2100	0.0025	0.0305	0.0004	0.0026	0.0002	2.06	194.5	8.3	193.5	2.1	193.6	2.3	52.9	3.2	
sbz09-56-12	22.9	404.1	468.4	0.0503	0.0004	0.2138	0.0027	0.0308	0.0004	0.0027	0.0002	0.86	209.3	16.7	196.7	2.3	195.7	2.4	55.4	3.2	
sbz09-56-13	87.9	2104.9	1264.8	0.0496	0.0002	0.2129	0.0020	0.0311	0.0003	0.0028	0.0001	1.66	176.0	9.3	196.0	1.7	197.5	1.9	55.8	2.6	
sbz09-56-14	97.5	2397.2	1230.4	0.0526	0.0003	0.2230	0.0018	0.0307	0.0002	0.0027	0.0001	1.95	322.3	13.0	204.4	1.5	195.2	1.5	55.5	2.4	
sbz09-56-15	85.8	2196.4	1142.7	0.0492	0.0002	0.2094	0.0014	0.0308	0.0002	0.0027	0.0001	1.92	166.8	7.4	193.1	1.2	195.8	1.4	55.0	2.3	
sbz09-56-16	130.9	3428.0	1528.9	0.0496	0.0001	0.2107	0.0014	0.0308	0.0002	0.0028	0.0001	2.24	176.0	10.2	194.1	1.2	195.5	1.3	55.8	2.3	
sbz09-56-18	130.7	3294.4	1536.2	0.0512	0.0002	0.2183	0.0019	0.0309	0.0002	0.0028	0.0001	2.14	255.6	9.3	200.5	1.6	196.1	1.4	57.1	2.5	
sbz09-56-20	138.3	3549.7	1626.2	0.0503	0.0002	0.2136	0.0013	0.0307	0.0002	0.0028	0.0001	2.18	209.3	2.8	196.5	1.1	195.2	1.3	57.5	2.8	

$\omega(\text{Th})$ 为 $(857.6 \sim 2\,848.7) \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.26 \sim 0.58$ 。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $157.1 \sim 162.9$ Ma (表 1)。17 个分析点偏离谐和线, 位于其右侧 (图 7D), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (159.9 ± 0.5) Ma (MSWD = 1.11), 可代表七拨子岩体的形成时代。

(5) 达子沟岩体 (SBZ09-51)
样品 $\omega(\text{U})$ 变化于 $(269.4 \sim 1\,612.1) \times 10^{-6}$, $\omega(\text{Th})$ 为 $(149.3 \sim 887.9) \times 10^{-6}$, Th/U 比值为

$0.35 \sim 0.73$ 。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和性较好, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $172.5 \sim 179.6$ Ma (表 1)。12 个分析点都集中于谐和线及其附近 (图 7E), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (176.5 ± 1.0) Ma (MSWD = 0.91), 代表达子沟岩体的侵位时代。

(6) 老商家岩体 (SBZ09-56)
样品 $\omega(\text{U})$ 变化于 $(468.4 \sim 1\,853.9) \times 10^{-6}$, $\omega(\text{Th})$ 为 $(404.1 \sim 4\,156.7) \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.86 \sim 2.39$ 。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和性较好,

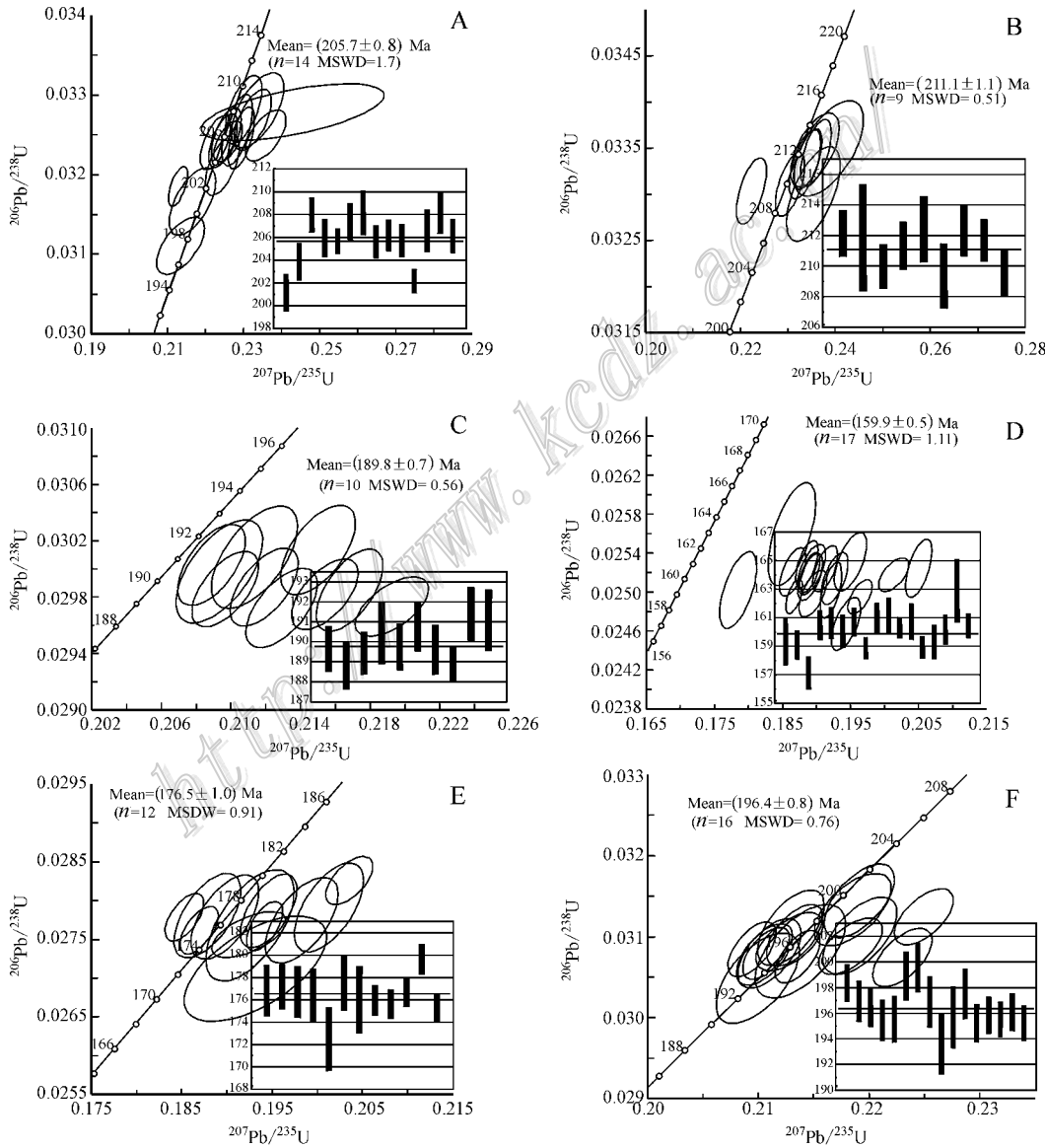


图 7 六柱坪岩体 (A)、三拨子西沟岩体 (B)、五拨子岩体 (C)、七拨子岩体 (D)、达子沟岩体 (E) 和老商家岩体 (F) 代表性样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 LA-ICP-MS zircon U-Pb age concordia diagrams of representative samples of intrusive rocks from Liuzhuping (A), Sanbozi Xigou (B), Wubozhi (C), Qibozhi (D), Dazigou (E) and Laoshangjia (F)

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $193.6\sim 199.6\text{ Ma}$ (表 1)。16 个分析点都集中于谐和线及其附近很小的区域内 (图 7F), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(196.4\pm 0.8)\text{ Ma}$ (MSWD=0.76), 可代表老商家岩体的形成时代。

4 讨论

4.1 矿区岩浆侵入活动与构造环境

矿区侵入岩发育, 岩石类型有 3 类, 似斑状二长花岗岩、二长花岗岩和花岗斑岩。6 件岩体锆石 U-Pb 年龄表明, 六柱坪细粒似斑状二长花岗岩年龄为 $(205.7\pm 0.8)\text{ Ma}$; 三拨子西沟细粒似斑状二长花岗岩年龄为 $(211.1\pm 1.1)\text{ Ma}$; 五拨子花岗斑岩年龄为 $(189.8\pm 0.7)\text{ Ma}$; 七拨子粗中粒二长花岗岩年龄为 $(159.9\pm 0.5)\text{ Ma}$; 达子沟细粒似斑状二长花岗岩年龄为 $(176.5\pm 1.0)\text{ Ma}$; 老商家花岗斑岩年龄为 $(196.4\pm 0.8)\text{ Ma}$ 。年龄结果表明, 矿区存在 4 期岩浆侵入活动, 第一期晚三叠世 ($211\sim 206\text{ Ma}$), 形成六柱坪和三拨子西沟细粒似斑状二长花岗岩; 第二期早侏罗世早期 ($196\sim 190\text{ Ma}$), 形成老商家和五拨子花岗斑岩; 第三期早侏罗世晚期 (177 Ma), 形成达子沟细粒似斑状二长花岗岩; 第四期晚侏罗世早期 (160 Ma), 形成七拨子粗中粒二长花岗岩。矿区岩浆侵入活动持续了 51 Ma 。

印支运动在燕山地区表现为形成不同方向的褶皱构造、逆冲推覆、岩浆活动、局部有浅变质作用 (崔盛芹等, 1983; 宋鸿林等, 1984; 吴珍汉等, 2001)。华北克拉通北缘的燕辽地区到阴山发育的三叠纪碱性岩带, 如赛马杂岩体、矾山杂岩体、姚家庄杂岩体、响水沟杂岩体、亚干核杂岩糜棱状花岗岩等 (牟保磊等, 1992; 阎国翰等, 2000; 王涛等, 2002)。邵济安等 (2000) 认为这些碱性岩以及镁铁-超镁铁质岩是早中生代幔隆背景下底侵作用的产物, 标志着中生代一个新的构造-岩浆活动的开始。在与矿区邻近的蓟县有形成于晚三叠世末的盘山复合花岗岩体 ($208\sim 203\text{ Ma}$), 其形成环境为中三叠世末的挤压作用向晚三叠世—早侏罗世的伸展作用转化时期 (杨富全等, 2007; 马寅生等, 2007)。四拨子-六拨子钼铜矿区最早期的晚三叠世 ($211\sim 206\text{ Ma}$) 岩浆侵入活动与盘山复合花岗岩体形成时代相近, 也形成于区域构造环境从挤压向伸展转化时期。

燕辽地区燕山期侵入岩主要是一套低硅、富碱的铝过饱和型辉长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩和二

长花岗岩类的钙碱性岩类 (朱大岗等, 1999)。其中早侏罗世有碱厂花岗岩 (锆石 U-Pb 年龄为 $185\sim 190\text{ Ma}$)、宽帮二长闪长岩 (锆石 U-Pb 年龄为 182 Ma)、杨家杖子花岗岩 (锆石 U-Pb 年龄为 189 Ma) (吴福元等, 2006)、兰家沟细粒花岗岩 (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 188.9 Ma) (代军治等, 2008)、青山口花岗岩 (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 199 Ma) (罗镇宽等, 2001) 等。马寅生等 (2002) 根据构造特征提出晚三叠世—侏罗纪燕辽地区为伸展的成盆沉积期。北京西山南大岭玄武安山岩, 形成时代为 $195\sim 180\text{ Ma}$ (Ren et al., 1996; Davis et al., 2001), 其地球化学特征表明, 这些火山岩形成于陆内伸展构造环境 (朱大岗等, 1999; 马寅生等, 2002; 杨晓勇等, 2004)。张遵忠等 (2009) 认为碰撞后的岩石圈伸展作用造成了燕辽成矿带早侏罗世大量花岗岩类的发育和斑岩型 (钼、铜) 矿的形成。四拨子-六拨子钼铜矿区的早侏罗世早期 ($196\sim 190\text{ Ma}$) 岩浆侵入活动和北京西山南大岭玄武安山岩一样, 形成于陆内伸展构造环境。四拨子-六拨子矿区第三期早侏罗世晚期的岩浆侵入活动形成的达子沟细粒似斑状二长花岗岩 (177 Ma) 与辽西新台门钼矿床赋矿的松北花岗斑岩 (181 Ma , 张遵忠等, 2009) 相近, 马寅生等 (2002) 提出早侏罗世末为区域挤压构造环境。矿区第四期晚侏罗世早期 (160 Ma) 岩浆侵入活动在区域上相当不发育, 见有辉长岩、闪长岩、石英二长岩、正长岩、花岗岩小侵入体。晚侏罗世, 整个中国东部进入滨太平洋构造域, 区域构造格局发生大转换, 华北板块北缘的区域性 EW 向、NE 向断裂复活, 进一步向 NE 向和 NNE 向转换 (赵越等, 2004)。

总之, 四拨子-六拨子矿区从晚三叠世开始到晚侏罗世早期经历了 4 期岩浆侵入活动, 持续了 51 Ma 。4 期岩浆侵入活动可以与燕山造山带的区域岩浆活动对应, 其对应的构造环境分别为从挤压向伸展转化环境、伸展构造环境、挤压构造环境、区域构造格局大转换环境。

4.2 成矿时代

四拨子-六拨子矿区钼铜矿化带位于中元古界长城系大红峪组的石英砂岩、长石石英砂岩及白云岩夹层与高于庄组的白云岩中, 围岩蚀变以矽卡岩化为主。根据矿化特征, 认为钼铜矿化与岩浆期后热液活动有关, 但地表的矿体附近和隐伏矿体的钻孔中未见岩体。因此, 矿区出露的哪期岩浆侵入活动与成矿有关, 关系到进一步找矿方向的确定。7 件

辉钼矿 Re-Os 加权平均年龄为 (194 ± 1) Ma, 等时线年龄为 (187.8 ± 4.5) Ma (本项目未刊数据), 与五拨子花岗斑岩 (189.8 ± 0.7) Ma 和老商家花岗斑岩 (196.4 ± 0.8) Ma 年龄在误差范围内基本一致。因此, 矿区第二期早侏罗世早期 $(196 \sim 190)$ Ma 岩浆侵入活动形成的花岗斑岩可能与钼成矿作用有关。目前发现的钼铜矿化主要集中在岩体外接触带围岩地层的矽卡岩化带, 花岗斑岩体中是否存在斑岩型铜钼矿化值得高度关注。

对燕辽地区钼(铜)多金属矿床成岩与成矿年龄统计表明, 成岩年龄和成矿年龄基本一致, 主要集中于 225 Ma 左右、185 Ma 左右、140 Ma 左右三个主要时期(代军治, 2008)。四拨子-六拨子矿区钼铜矿化与区域上的第二期成矿作用时代相近, 如辽西杨家杖子、兰家沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄分别为 189 Ma、186.5 Ma (黄典豪等, 1996)。多数学者认为早侏罗世蒙古-鄂霍茨克海的消减、闭合作用导致燕辽地区在强烈挤压作用和挤压后应力松弛期间发生了强烈的岩浆活动, 并且伴随着大规模的钼、金矿化作用(李锦轶, 1998; 郑亚东等, 2000; Davis et al., 1998, 2001; 邓晋福等, 2005; 张遵忠等, 2009)。四拨子-六拨子矿区钼铜矿化是早侏罗世燕辽地区大规模岩浆活动和钼铜成矿事件中的组成部分。

5 结 论

(1) 四拨子-六拨子钼铜矿位于燕辽钼矿带东部。辉钼矿化主要呈浸染状、细(网)脉状、薄膜状分布于长城系大红峪组和高于庄组石英砂岩、长石石英砂岩、白云岩的裂隙和微裂隙中。围岩蚀变普遍, 主要是矽卡岩化(透辉石、透闪石、绿帘石、角闪石), 其次是硅化, 少量钾长石化。其中辉钼矿主要与硅化有关。

(2) 矿区存在 4 期岩浆侵入活动, 第一期为一早侏罗世晚期 $(211 \sim 206)$ Ma, 形成六柱坪和三拨子西沟细粒似斑状二长花岗岩; 第二期为一早侏罗世早期 $(196 \sim 190)$ Ma, 形成老商家和五拨子花岗斑岩; 第三期为早侏罗世晚期 (177) Ma, 形成达子沟细粒似斑状二长花岗岩; 第四期为晚侏罗世早期 (160) Ma, 形成七拨子粗中粒二长花岗岩。矿区岩浆侵入活动持续了 51 Ma。

(3) 五拨子、老商家花岗斑岩 $(196 \sim 190)$ Ma 与 7 件辉钼矿 (194 ± 1) Ma (本项目未刊数据) 形成时

代一致, 钼矿化主要与硅化有关, 推测钼矿化与花岗斑岩岩浆期后热液活动有关。

志 谢 参加野外工作的还有河北地矿局第五地质大队的王立生先生, 锆石 LA-MS-ICP U-Pb 年龄测试过程中得到侯可军博士的大力支持, 在此一并致以衷心的感谢!

参考文献/References

- 崔盛芹, 李锦蓉. 1983. 试论中国滨太平洋带的印支运动[J]. 地质学报, 57(1): 51-62.
- 代军治, 毛景文, 谢桂青, 杨富全, 赵财胜. 2007a. 辽西兰家沟钼矿床成矿流体特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 26(4): 443-454.
- 代军治, 谢桂青, 段焕春, 杨富全, 赵财胜. 2007b. 河北撒岱沟门斑岩型钼矿床成矿流体特征及其演化[J]. 岩石学报, 23(10): 2519-2529.
- 代军治. 2008. 燕辽成矿带钼(铜)矿床成矿作用及成矿动力学背景(博士论文[D]). 导师: 毛景文, 张作衡. 北京: 中国地质科学院. 1-80.
- 代军治, 毛景文, 赵财胜, 李福让, 王瑞廷, 谢桂青, 杨富全. 2008. 辽西兰家沟钼矿床花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石化学特征[J]. 地质学报, 11(82): 1555-1564.
- 邓晋福, 赵国春, 苏尚国, 刘翠, 陈亦寒, 李芳凝, 赵兴国. 2005. 燕山造山带燕山期构造叠加及其大地构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 29(2): 157-165.
- 董得茂, 李殿奎, 崔 彬. 1985. 北京市大庄科爆破角砾岩型钼矿床地质特征[J]. 7 23-26.
- 杜保峰, 魏俊浩, 王 启, 李艳军, 刘国春, 于海涛, 刘永利. 2010. 中国东部钼矿成矿背景与成岩-成矿时差讨论[J]. 矿床地质, 29(6): 935-955.
- 段焕春, 秦正永, 林晓辉, 张宝华, 刘学武, 张 晓, 郭鹏志, 韩 芳, 秦 磊, 代军治. 2007. 河北丰宁县大草坪钼矿区岩体锆石 U-Pb 年龄研究[J]. 矿床地质, 26(6): 634-642.
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 539-628.
- 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.
- 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 刘兰笙, 孙亚莉, 邹晓秋. 1996. 华北地台钼(铜)矿床成矿年代学研究——辉钼矿铼-钨年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 15(4): 365-373.
- 李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识[J]. 地质评论, 44(4): 339-347.
- 李瑞保, 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 冯建赞, 孙 雨, 张亚峰, 刘战庆. 2009. 西秦岭南缘勉略带琵琶寺基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质学报, 83(11): 1612-1623.
- 罗镇宽, 关 康, 裴有守, 苗来成. 2001. 冀东金厂峪金矿区钠长岩脉及青山口花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义[J]. 地质找矿论丛, 16(4): 226-231.

- 马寅生, 吴满路, 曾庆利. 2002. 燕山及邻区中生代挤压与伸展的转换和成矿作用[J]. 地球学报, 23(2): 115-121.
- 马寅生, 曾庆利, 宋彪, 杜建军, 杨富全, 赵越. 2007. 燕山中段盘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定及其构造意义[J]. 岩石学报, 23(3): 547-556.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 169-188.
- 牟保磊, 阎国翰. 1992. 燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义[J]. 地质学报, 66(2): 108-121.
- 裴荣富, 吕凤翔, 范继璋, 方如恒, 齐朝顺. 1998. 华北地块北缘及其北侧金属矿床成矿系列与勘查[M]. 北京: 地质出版社. 1-237.
- 芮宗瑶, 施林道, 方如恒. 1994. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社. 1-576.
- 邵济安, 牟保磊, 张履桥. 2000. 华北东部中生代构造格局转换过程中的深部作用与浅部响应[J]. 地质论评, 46(1): 32-40.
- 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(增刊): 26-30.
- 宋鸿林, 葛梦春. 1984. 从构造特征论北京西山的印支运动[J]. 地质论评, 30(1): 77-80.
- 王涛, 郑亚东, 刘树文, 李天斌, 马铭波. 2002. 中蒙边界亚干变质核杂岩糜棱状钾质花岗岩——早中生代收缩与伸展构造体制的转换标志[J]. 岩石学报, 18(2): 177-186.
- 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 柳小明. 2006. 辽西东南部中生代花岗岩时代[J]. 岩石学报, 22(2): 315-325.
- 吴珍汉, 吴中海, 江万, 周继荣. 2001. 中国大陆及邻区新生代构造—地貌演化过程与机理[M]. 北京: 地质出版社. 100-140.
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 何国琦, 谭林坤, 赵晖, 何中甫. 2000. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义[J]. 中国科学(D辑), 30(4): 383-387.
- 杨富全, 赵越, 曾庆利, 吴海, 夏浩东. 2007. 天津蓟县盘山 I 型-A 型复合花岗岩体——区域构造环境转变的记录[J]. 岩石学报, 23(3): 529-546.
- 杨晓勇, 范蔚茗, 郭锋, 王岳军, 李超文. 2004. 古亚洲洋对华北陆缘岩石圈的改造作用: 来自于西山南大岭组中基性火山岩的地球化学证据[J]. 岩石学报, 20(3): 557-566.
- 曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 覃锋, 陈伟军, 张瑞斌, 于昌明, 叶杰. 2009. 华北克拉通北缘鸡冠山斑岩钼矿床成矿年代及印支期成矿事件[J]. 岩石学报, 25(2): 393-398.
- 章百明, 赵国良, 马国玺, 毕伏科. 1996. 河北省主要成矿区带矿床成矿系列及成矿模式[M]. 北京: 石油工业出版社. 1-273.
- 张遵忠, 吴昌志, 顾连兴, 冯慧, 郑远川, 黄建华, 李晶, 孙亚莉. 2009. 燕辽成矿带东段新台门钼矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(3): 313-320.
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡健民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地学前缘, 11(3): 319-328.
- 郑亚东, Davis G A, 王琮, Darby B J, 张长厚. 2000. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J]. 地质学报, 74(4): 289-302.
- 朱大岗, 吴珍汉, 崔盛芹, 吴淦国, 马寅生, 冯向阳. 1999. 燕山地区中生代岩浆活动特征及其与陆内造山作用关系[J]. 地质论评, 45(2): 163-172.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y and Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143: 602-622.
- Claesson S, Vetrin V, Bayanova T and Downes H. 2000. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic[J]. Lithos, 51(1-2): 95-108.
- Davis G A, Wang C, Zheng Y D, Zhang J J, Zhang C H and Gehrels G E. 1998. The enigmatic Yinshan fold-and-thrust belt of northern China: New views on its intraplate contractional style[J]. Geology, 26: 43-46.
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, Darby B J, Zhang C H and Gehrels G E. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, northern China[J]. Geological Society of America Memoir, 194: 171-197.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao C G 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.
- Ren D, Jia Z P and Liu L W. 1996. Mesozoic stratigraphy and faunae in the Luanping-Chengde region, Hebei Province[A]. In: 30th Int. geol. congress field trip guide(Vol. 6)[C]. Beijing: Geol. Pub. House. T218.1-T218.17.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. Chemical Geology, 184: 123-138.
- Slama J, Kosler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hancher J M, Horstwood M S A, Morris G A, 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.