

华北北缘张宣地区东坪金矿中的两期锆石： 对成矿年龄的约束*

李长民¹, 邓晋福¹, 陈立辉², 苏尚国¹, 李惠民³, 胡森林², 刘新秒³

(1 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093; 3 天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要 东坪金矿床位于华北克拉通北部边缘的张宣地区, 产于水泉沟碱性杂岩体南部的中细粒正长岩中, 属于低硫化物钾长石石英脉型碲金矿床。金矿石包括低硫化物碲金石英脉型和钾质蚀变岩型两种类型。文章对产于东坪金矿1号脉的钾长石石英脉中的锆石进行了成因矿物学和 LA-ICP-MS U-Pb 年代学的系统研究, 结果表明, 矿脉中的锆石可以分成岩浆锆石和热液锆石两种成因类型。岩浆锆石具有自形到半自形结构、柱状晶型, 在电子探针背散射电子图像(BSE)上呈暗灰色, 在阴极发光图像(CL)上具有明显的岩浆振荡环带。热液锆石多呈不规则状充填在岩浆锆石中, 也有呈他形晶独立存在的, 在 BSE 图像上呈亮灰白色, 而在 CL 图像上为深黑色(无阴极发光)。岩浆锆石的 Th/U 含量和 Th/U 比值相对较低, 其 U-Pb 加权平均年龄为 $(380.5 \pm 2.6) Ma$, 说明水泉沟碱性杂岩体形成于晚泥盆世。热液锆石的 Th/U 含量和 Th/U 比值较岩浆锆石明显增高, U-Pb 加权平均年龄为 $(140.2 \pm 1.3) Ma$, 说明东坪金矿床形成于早白垩世。因此, 成岩与成矿年龄相差近 240 Ma, 表明东坪金矿床的形成与水泉沟碱性杂岩体的岩浆侵位事件无直接关系。通过对区域地质背景的综合分析, 作者认为成矿流体可能与该区燕山期的岩浆活动有关。

关键词 地质学; U-Pb 定年; 岩浆锆石; 热液锆石; 石英脉; 东坪金矿

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Two periods of zircon from Dongping gold deposit in Zhangjiakou-Xuanhua area, northern margin of North China: Constraints on metallogenic chronology

LI ChangMin¹, DENG JinFu¹, CHEN LiHui², SU ShangGuo¹, LI HuiMin³, HU SenLin²
and LIU XinMiao³

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3 Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract

The Dongping gold deposit is located in Zhangjiakou-Xuanhua area of Hebei Province, on the northern margin of the North China Craton. This ore deposit is mainly hosted by the medium-fine grained syenite in the southern part of the Shuiquangou alkaline complex. There are two types of gold ores in this deposit, namely the telluride mineral-bearing and low-sulfide quartz veins and the intense K-feldspar alteration type. The authors performed a systematic mineralogical and U-Pb geochronologic study of zircon minerals from No. 1 auriferous quartz vein. Two types of zircons were recognized in this vein, i. e., magmatic and hydrothermal ones. The

* 本文为 973 项目(2006CB403508)、国土资源部计划项目(1212010711814)和国家自然科学基金重点项目(40234048)联合资助成果

第一作者简介 李长民,男,1962年生,在读博士生,岩石学专业。Email: lchangmin62@yahoo.com.cn

收稿日期 2009-11-11; 改回日期 2010-03-05。张绮玲编辑。

magmatic zircon is characterized by euhedral-subhedral crystals with the prismatic form, dark-gray color in the backscattered electron (BSE) image, and clear magmatic oscillatory zoning in the cathodoluminescence (CL) image. The hydrothermal zircon occurs mainly in irregular forms and occasionally as anhedral grains, fills the magmatic zircon, and shows grayish white color in the BSE image and dark black color (non-luminescent) in the CL image. U-Pb analyses of the magmatic zircon indicate a Devonian event with a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of (380.5 ± 2.6) Ma. Therefore, the rock-forming process of the Shuiquangou alkaline complex is confidently constrained in Late Devonian. Compared with the magmatic zircon, the hydrothermal zircon has not only much higher Th, U content and Th/U ratios but also much younger U-Pb age of (140.2 ± 1.3) Ma. Therefore, the ore-forming period of the Dongping gold deposit is confidently constrained in Early Cretaceous. Obviously, there is a time gap of about 240 Ma between the rock-forming process of the alkaline complex and the ore-forming process in the Dongping gold deposit. It is therefore concluded that there is no direct genetic relationship between the Shuiquangou alkaline complex and the Dongping gold deposit. According to local geological background, the authors hold that the ore-forming fluids might be genetically associated with Mesozoic magmatism in this area.

Key words: geology, U-Pb dating, magmatic zircon, hydrothermal zircon, quartz vein, Dongping gold deposit

河北省张宣地区东坪大型金矿床,产于水泉沟碱性正长岩杂岩体内,属于低硫化物含金钾长石石英脉型金矿床。近年来,不同研究者曾利用不同方法对东坪金矿进行过成岩成矿年龄测定,获得了一大批数据,但由于欠缺高精度成岩成矿年代学资料,特别是欠缺锆石微区定年资料,所测年龄数据参差不齐,成矿年龄数据比较分散($120 \sim 350.9$ Ma)(沈保丰等,2000;宋国瑞等,1996),从而导致对水泉沟碱性杂岩体与金矿的成因认识上有较大分歧。为了对东坪金矿的成岩与成矿年龄有一个清楚的认识,笔者最近采用 LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 法测定了东坪金矿一号脉中的含金钾长石石英脉样品,以探讨金矿精确的成矿时代以及金矿与围岩水泉沟碱性杂岩体的成因联系。

1 地质概况

东坪金矿田位于华北板块北缘(图 1a),展布于崇礼-赤城深大断裂以南 10 km 处(图 1b)。区域上出露的主要地层有太古宙桑干群变质岩系、古元古界红旗营子群变质岩。中新元古界盖层仅见于图 1b 东南角,主要是长城系浅海相碎屑岩、碳酸盐沉积岩系。

上侏罗统张家口组酸性、中酸性火山碎屑岩在区内分布广,主要分布在水泉沟正长岩体西部和东坪金矿田的东南侧(图 1b),以不整合形式覆盖在前寒武纪地层以及水泉沟碱性杂岩体之上(宋国瑞等,1996)。最近,韦忠良等(2008)用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测定的张家口地区的张家口组火山岩年龄范围为 $143 \sim 136$ Ma,形成于燕山中晚期。

水泉沟碱性杂岩体呈近东西向狭长带状出露(图 1b),岩体东西长约 55 km,南北宽 5~8 km,面积约 350 km²。水泉沟岩体的北、南、东部分别出露有红花梁、上水泉和温泉花岗岩体(宋国瑞等,1996)(见图 1b)。组成碱性杂岩体的岩石类型有辉石闪长岩、角闪二长岩、石英二长岩、碱性正长岩、石英碱长正长岩、碱长花岗岩等,其中,中细粒正长岩类与中粗粒角闪二长岩类为碱性杂岩体的主要岩石类型。中细粒正长岩中普遍见有霓辉石和黑榴石等典型的碱性岩浆矿物(张招崇等,1997;

包志伟等,2003;邵济安等,2004)。近年来的 Sr、Nd、Pb、O 同位素证据表明,水泉沟碱性杂岩体是来源于富集的上地幔与下地壳部分熔融的岩浆不均匀混合所形成的碱性杂岩体(李长民,1999;包志伟等,2003;江思宏等,2003;Jiang,2005)。

在张宣地区金矿集中区,几乎所有的金矿床都分布于水泉沟碱性杂岩体的内外接触带,矿石组分以富含碲为特征,属于碲化物金矿床。由于区内绝大多数金矿床(点)分布于水泉沟碱性正长岩体的内外接触带,因此,多数地质工作者推测区内绝大部分金矿与碱性正长岩体有直接的时空和成因联系(宋国瑞等,1996)。东坪金矿产于中细粒正长岩中(图 1b),主要由一系列平行排列、走向 NNE 向、NE 向和 NW 向的石英脉、石英网脉和石英脉两侧的钾质蚀变岩组成(图 1c)。金矿类型主要包括低硫化物碲金石英脉型和钾质蚀变岩型 2 种。主要围岩蚀变有钾长石化、钠长石化、硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化,其中,钾长石化最为普遍,且常在石英脉两侧对称出现,几十厘米到几米厚,这些蚀变带也都含金,是金矿体的一部分。金属矿物含量较少,主要有黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、斑铜矿、磁铁矿等,脉石矿物主要由石英、微斜长石和少量钠长石组成,主要金矿物为自然金和碲金矿。卢德林等(1993)根据切割关系、镜下观察和包裹体测温等把热液活动划分为 5 期:①粗粒黄铁矿-石英脉期,含微量金,均一温度为 $329 \sim 337^\circ\text{C}$;②黄铁矿-金-石英脉期,是金的主要矿化期之一,均一温度为 $315 \sim 324^\circ\text{C}$;③多金属硫化物-金-石英脉期,为金的最主要矿化期,均一温度为 $244 \sim 285^\circ\text{C}$;④灰黑色致密玉髓状硅质脉交代充填期,含微量金,均一温度为 $150 \sim 185^\circ\text{C}$;⑤重晶石-碳酸盐-石英细脉期。其中的④、⑤两期热液活动极弱。

有关水泉沟碱性杂岩体的成岩时代和东坪金矿田成矿时代前人做了大量工作,详见表 1。

2 样品制备和测试方法

锆石的分选是在河北省区域地质矿产调查研究院(廊坊)完成的。部分锆石的阴极发光图像在中国地质科学院地质研

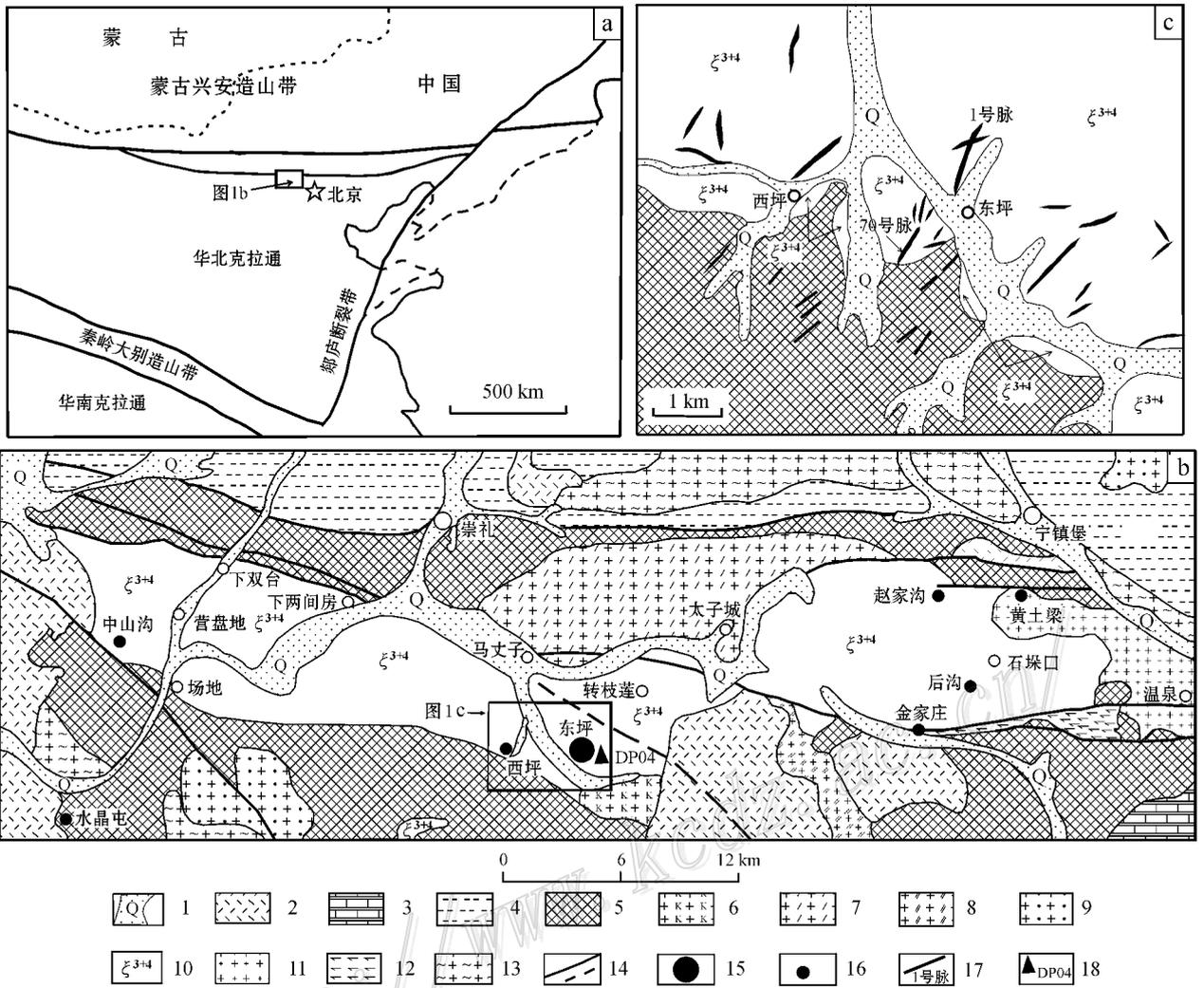


图 1 河北省张家口地区水泉沟碱性杂岩体及金矿床区域地质略图(据罗镇宽等, 2001; Mao et al., 2003a; 宋国瑞等, 1996 资料修改)

1—第四系; 2—燕山期中酸性火山碎屑岩; 3—中新元古代盖层; 4—古元古代红旗营子群变质岩; 5—太古代桑干群变质岩; 6—上水泉坪长花岗岩; 7—红花梁黑云母花岗岩; 8—二长花岗岩; 9—斑状花岗岩; 10—水泉沟碱性杂岩体; 11—温泉巨斑状花岗岩; 12—超基性岩; 13—太古宙花岗片麻岩; 14—断层; 15—大型金矿床; 16—中小型金矿床; 17—矿脉及编号; 18—采样位置及编号

Fig. 1 Simplified geological map of Shuiquangou alkaline complex, Zhangjiakou area, Hebei Province (modified from Luo Zeng Kuan et al. 2001; Mao et al. 2003a; Song Guorui et al., 1996)

1—Quaternary; 2—Yanshanian felsic to intermediate pyroclastic rock; 3—Neoproterozoic and Mesoproterozoic cap rock; 4—Paleoproterozoic Hongqiyingzi Group; 5—Archean Sanggan Group; 6—Shangshuiquan alkalic feldspar granite; 7—Honghualiang biotite granite; 8—Monzonitic granite; 9—Porphyritic granite; 10—Shuiquangou alkaline complex; 11—Wenquan macrophyric granite; 12—Ultrabasic rock; 13—Archean granitic gneiss; 14—Fault; 15—Large-sized gold deposit; 16—Small-middle sized gold deposit; 17—Ore-bearing vein and its serial number; 18—Sampling location and its serial number

研究所电镜室完成。本次年龄测试是在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成的。先在双目显微镜下仔细挑选锆石颗粒, 保证所选颗粒大小比较均匀, 涵盖不同的长宽比例和颜色。然后, 将所挑选的锆石颗粒粘在双面胶上, 用环氧树脂和三乙醇胺配制的胶固定, 细磨至锆石颗粒最大面后抛光。利用 JEOL 8100 电子探针获得锆石的背散射电子图像 (BSE images)。结合锆石的反射光和透射光图像, 避开其内部

的裂隙和包裹体, 进一步精选用于锆石微区定年的样品。

锆石 U-Pb 定年所用仪器为带激光剥蚀系统的 Agilent 7500a ICP-MS。用激光束对所选定的锆石测试区域进行烧蚀, 被烧蚀出来的样品用氦气作为载体输送到 ICP-MS 中, 与氦气在 30 cm³ 混合室混合后进入等离子体中电离, 然后用质谱仪对被电离的物质进行同位素比值的测定, 根据被测矿物与相应标准矿物的同位素比值测定结果进行有关元素含量及

表 1 不同测年方法获得的水泉沟碱性杂岩体和东坪金矿的同位素年龄表

Table 1 Isotopic ages of the Dongping gold deposit and the Shuiquanguou alkalic complex determined by different methods

测定方法	测定对象	采样位置	年龄/Ma	资料来源
K-Ar 法	全岩、钾长石	矿区多处	126~257	宋国瑞等,1996
Rb-Sr 等时线法	全岩	多处	260.0~748.8	宋国瑞等,1996
Ar-Ar 法	角闪正长岩中角闪石	中山沟	327.4±9	宋国瑞等,1996
常规锆石 U-Pb 法	二长岩中锆石	混合样品	99X(上交点年龄)	魏菊英等,1994
常规锆石 U-Pb 法	碱长正长岩中锆石	东坪金矿	1718±6X(上交点年龄)	莫测辉等,1997
单颗粒锆石 U-Pb 法	碱长正长岩中锆石	东坪金矿	1607~1667	梁华英等,1998
单颗粒锆石 U-Pb 法	钾长石石英脉	东坪 1 号脉	350.9±0.9	陆松年等,1997
颗粒锆石 U-Pb 法	石英二长岩中锆石	下三道河	410.2±1.1	陆松年等,1997
颗粒锆石 U-Pb 法	角闪二长岩中锆石	中山沟	410.5±1.4	胡小碟等,1997
SHRIMP 锆石 U-Pb 法	二长岩	东坪金矿	390±6	罗镇宽等,2001
SHRIMP 锆石 U-Pb 法	正长岩	后沟金矿	386±6	罗镇宽等,2001
Ar-Ar 法	矿脉中绢云母	东坪金矿	150	Hart et al., 2002

被测矿物同位素年龄的计算。

数据采集需要 100 s,其中背景测量时间 40 s,信号测量时间 60 s。测试中每个“RUN”包含 4 个外标、1 个内标和 10~12 个测试样品。本次实验采用的外标为 GJ-1(609 Ma),内标为 Mud Tank(735 Ma),每个“RUN”中 10~12 个测试样品前后各测两个 GJ-1, ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb 、 ^{232}Th 和 ^{238}U 作为采集对象用来计算年龄。本次实验测定的 GJ-1 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $(609 \pm 10) \text{ Ma}$ (1σ),与 Simon 等(2004)用 TIMS 分析法测得的 $(608.5 \pm 0.4) \text{ Ma}$ 一致。内标 Mud Tank 被用来测试仪器的稳定性和重复能力,本次实验测定结果为: $(730 \pm 10) \text{ Ma}$ (1σ)。

工作参数:功率 1300 W,氦气流速 1 L/min,氟气流速 1.3 L/min,激光剥蚀系统采用 Nd:YAG213 nm 紫外激光器,激光脉冲重复频率为 5 Hz,测试脉冲能量为 10~20 J/cm²,剥蚀直径为 30 μm。

导出的原始的 ICP-MS 数据为 ASCII 格式,然后用 GLITTER 软件进行处理,普通 Pb 的校正使用 Andersen (2002)的方法,使用 Isoplot(ver 2.49)(Ludwig, 2001)进行 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄的计算与谐和曲线图的投影。

3 锆石特征、样品描述和分析结果

为了得到东坪金矿精确的成矿年龄,以及水泉沟碱性正长岩的形成时代,本次研究工作在东坪金矿 1 号脉深部采集了钾长石石英脉样品(DP04)。为了研究不同锆石颗粒以及同一锆石颗粒不同部位的成因类型,还分别照射了锆石样品的显微照片和背散射电子图像(BSE)以及锆石的阴极发光电子(CL)图像,通过对这些不同锆石以及同一锆石的不同区域进行内部结构、微量元素特征等方面的综合研究,然后对锆石进行微区原位同位素年龄测试,以便获得不同锆石颗粒以及同一锆石矿物内部不同成因锆石的形成时间,为成岩成矿同位素直接定年,提供精确的年代学数据。

DP04 号样产自产于中细粒正长岩中的东坪金矿区 1 号脉深部(1464 中段)主矿化期第 3 期的钾长石石英脉,样品重 26 kg,岩性为含金钾长石石英脉细脉(脉宽 1~15 cm),主要由石英、微斜长石和微斜条纹长石等矿物组成。先从样品中挑选出锆石 1000 多粒,在双目镜下仔细挑选裂隙少、晶型较完好、形态、大小和颜色不同的锆石 21 颗,并对这 21 颗锆石进行了详细的 BSE 图像和 CL 图像的综合研究,部分代表性锆石的 BSE 图像见图 2,部分代表性锆石的 CL 图像见图 3。锆石颗粒长宽比为 1:1.1~1:2.3,平均 1:1.6 左右,长轴长 129~468 μm。部分锆石晶型完好,无色或浅紫红色,呈柱状或长柱状,四方双锥晶面发育,主要为(100)(110)(111)的聚形,部分锆石晶型不完好,呈近等轴状、棱角状或不规则状。在 BSE 图像上能隐约可见岩浆环带构造,多数锆石具有深、浅两种颜色区域。一般深色区域(暗灰-深灰色)年龄大,在 CL 图像上对应区域具有明显的岩浆振荡环带和亮色的 CL 图像(见图 3),表明在 BSE 图像上深色锆石区域属岩浆锆石(汪相等,2008;Belousova et al., 2002;吴元保,2004;Hoskin et al., 2003),这些区域的微量元素 Th、U 和 Th/U 比值相对较低(见表 2)。其中, $w(\text{Th})$ 为 $(17 \sim 273) \times 10^{-6}$,平均 82×10^{-6} ; $w(\text{U})$ 范围为 $(110 \sim 544) \times 10^{-6}$,平均 308×10^{-6} ; Th/U 比值范围为 0.07~0.45,平均 0.25。在 BSE 图像上呈浅色区域(灰白-亮灰白色)的锆石,多呈不规则状,具明显的交代结构产于岩浆锆石中(如图 2 中 5-2 和 10-2 号测点所在的样品区域),年龄小,这些对应锆石区域在 CL 图像上则呈暗黑-深灰色(具无阴极发光特征)(图 3),这些微区的 Th/U 比值以及 $w(\text{Th})$ 和 $w(\text{U})$ 明显偏高,并且变化范围很大,属热液锆石(详见讨论部分)。

本次试验共对 21 粒锆石进行了 28 点 LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 年龄分析,所有测点的分析结果列于表 2。21 颗锆石 28 个测点明显分成两组年龄,在 BSE 图像上深色区域(岩浆锆石)共有 17 个测点,在锆石 U-Pb 谐和图上(图 4),除 11-1 号和 14-1 号偏离一致曲线较远而产生不一致年龄外,其余 15 个点落在 U-Pb 年龄谐和曲线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 单点

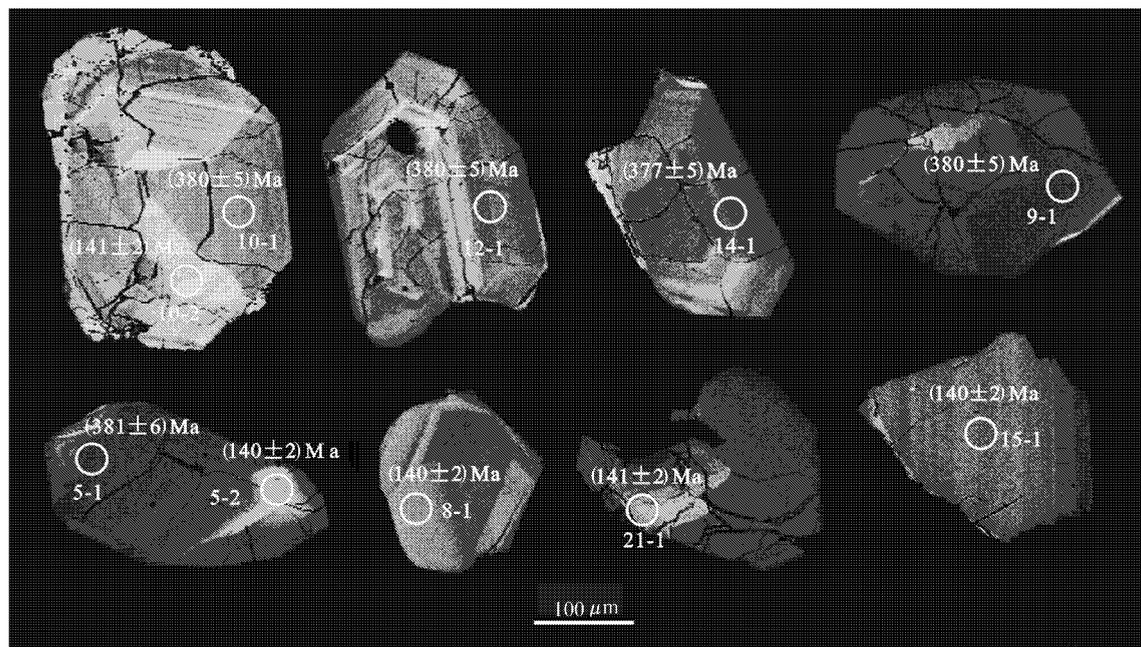


图 2 东坪金矿区石英脉锆石的 BSE 图像

Fig. 2 BSE images of zircons from quartz veins in the Dongping gold deposit

表 2 东坪金矿锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 2 U-Pb dating of the Dongping gold deposit

点号	$w_B/10^{-6}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素原子比值						表面年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm \%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm \%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm \%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1-1	31	459	0.07	0.0542	1.1	0.4529	9.3	0.0606	0.8	379	24	380	5
1-2	17	110	0.15	0.0544	1.5	0.4568	12.2	0.0610	0.9	386	35	381	5
2-1	23	276	0.08	0.0539	0.9	0.4514	7.6	0.0607	0.8	367	18	380	5
3-1	20	119	0.17	0.0550	1.7	0.4616	13.1	0.0608	0.8	414	72	381	5
3-2	39	539	0.07	0.0546	0.8	0.4590	7.3	0.0610	0.8	396	17	381	5
4-1	273	544	0.50	0.0535	0.8	0.4515	7.4	0.0612	0.8	351	17	383	5
5-1	28	148	0.19	0.0552	1.8	0.4634	14.5	0.0609	0.9	419	43	381	6
7	141	389	0.36	0.0548	1.0	0.4596	8.3	0.0609	0.8	403	20	381	5
9	53	211	0.25	0.0549	1.1	0.4599	9.3	0.0607	0.8	409	23	380	5
10-1	177	448	0.40	0.0542	0.9	0.4544	7.5	0.0608	0.8	381	18	380	5
12	61	247	0.25	0.0547	1.2	0.4580	10.0	0.0608	0.8	399	26	380	5
13	145	324	0.45	0.0553	1.1	0.4639	9.0	0.0608	0.8	426	22	380	5
16	179	395	0.45	0.0529	1.0	0.4441	8.5	0.0609	0.8	325	22	381	5
17	28	179	0.16	0.0544	1.9	0.4525	14.8	0.0604	0.9	386	82	378	5
18	26	301	0.09	0.0556	1.2	0.4660	9.7	0.0608	0.8	436	24	380	5
11	113	358	0.32	0.0557	1.0	0.5031	9.3	0.0655	0.8	440	20	409	5
14	40	191	0.21	0.0598	1.9	0.4961	14.4	0.0602	0.8	595	71	377	5
4-2	9451	6666	1.42	0.0603	0.8	0.1830	2.6	0.0220	0.3	614	14	140	2
6-1	543	3382	0.16	0.0553	0.8	0.1663	2.7	0.0218	0.3	422	17	139	2
8	494	3167	0.16	0.0482	1.5	0.1455	4.0	0.0219	0.3	108	71	140	2
10-2	9859	6030	1.63	0.0539	0.7	0.1638	2.3	0.0221	0.3	365	14	141	2
15	834	4542	0.18	0.0543	0.9	0.1648	2.7	0.0220	0.3	384	17	140	2
19	5258	6293	0.84	0.0606	0.9	0.1844	2.9	0.0221	0.3	623	15	141	2
20	16202	9480	1.71	0.0552	0.8	0.1667	2.5	0.0219	0.3	419	15	140	2
21	8109	5596	1.45	0.0575	0.8	0.1746	2.7	0.0220	0.3	509	16	141	2
5-2	8526	6720	1.27	0.0555	0.8	0.1681	2.6	0.0220	0.3	431	16	140	2
2-2	15651	8307	1.88	0.0860	5.8	0.2540	16.8	0.0214	0.3	1338	135	137	2
6-2	13866	7309	1.9	0.0852	1.2	0.25911	3.8	0.0221	0.3	1321	13	141	2

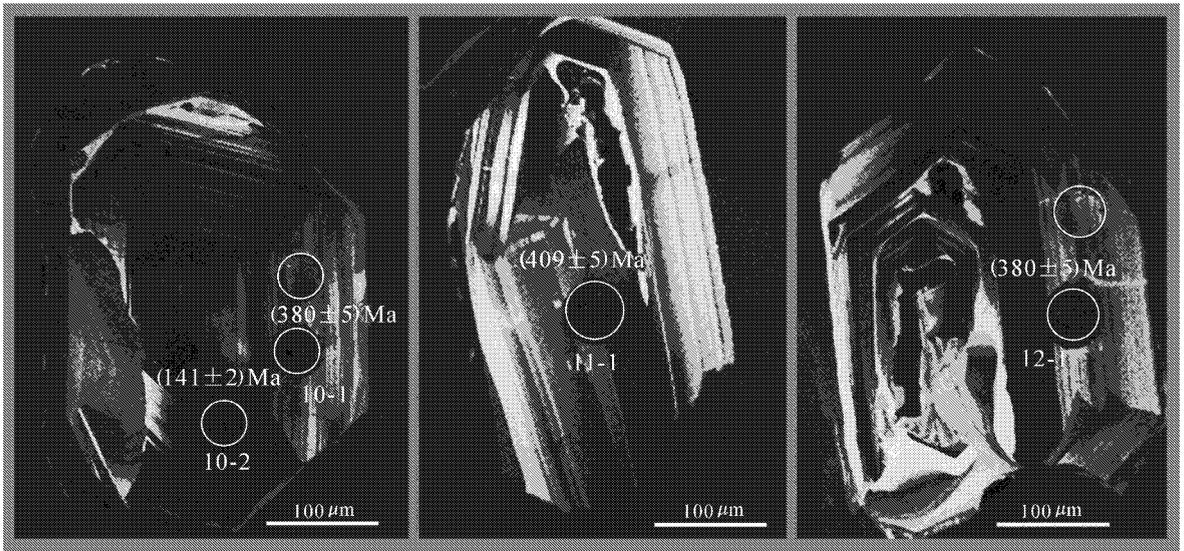


图3 东坪金矿区石英脉锆石的CL图像

Fig. 3 CL images of zircons from the quartz veins in the Dongping gold deposit

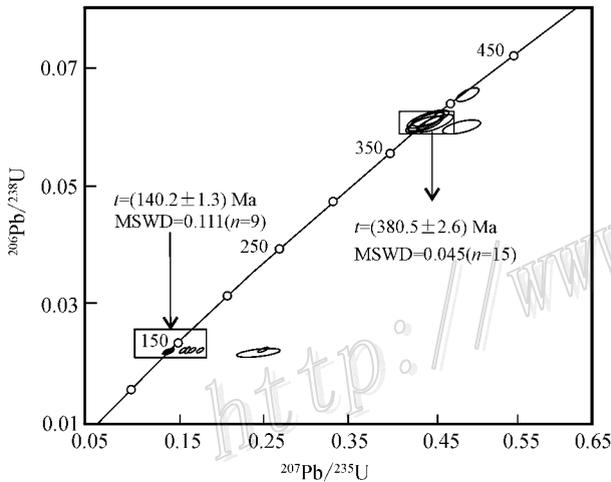


图4 东坪金矿石英脉中锆石U-Pb年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagram of zircons from quartz veins in the Dongping gold deposit

年龄值在378~383 Ma之间,变化范围小,最大变化范围为5 Ma,在误差范围内一致,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(380.5 \pm 2.6) \text{ Ma}$ ($n=15$, MSWD=0.045,置信度95%),这个年龄代表了水泉沟碱性杂岩体的形成时间。

在BSE图像上浅色区域(热液锆石)的11个测点,除2-2号、6-2号偏离一致曲线较远,数据质量相对较差而产生不一致年龄外,其余9个点落在U-Pb年龄谐和曲线上或附近(图4), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 单点年龄在139~141 Ma之间,变化范围小,最大变化范围为2 Ma,在误差范围内一致,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(140.2 \pm 1.3) \text{ Ma}$ ($n=9$, MSWD=0.111,置信度95%),这个年龄记录了含金钾长石石英脉的侵位年龄。

4 讨论

4.1 水泉沟碱性杂岩体的侵位年龄

锆石作为一种地球化学性质稳定的副矿物,具有较高的U-Pb封闭温度。然而,在有流体相参与的情况下,热液流体可以沿着锆石晶体边缘、裂隙或晶格缺陷对锆石进行改造和交代作用。当热液蚀变作用进一步增强时,在锆石的内部或边部会出现较宽的蚀变边,其U-Pb体系可以完全重置。对这些热液蚀变作用较为彻底的锆石晶域进行微区定年,可以得到热液蚀变作用的准确年龄(Liati et al., 2002)。但是由于锆石本身的稳定性,在受交代蚀变的锆石中仍会有保留锆石U-Pb体系的封闭性而未被重置的区域。对这些没有受热液蚀变作用影响的锆石微区进行U-Pb定年,仍旧可以得到反映这些原生锆石或岩石形成的地质年龄(Liati et al., 2002; Tomaschek et al., 2003)。因此本文得到的在BSE图像上呈深色区域(暗灰-深灰色)的锆石,其对应区域在CL图像上具有明显的岩浆振荡环带和亮色CL图像的锆石微区属于岩浆锆石,这些锆石的成分点落在U-Pb年龄谐和曲线上,15个测点的LA-ICP-MS锆石U-Pb加权平均年龄为 $(380.5 \pm 2.6) \text{ Ma}$,这个年龄代表了保留在锆石中U-Pb体系未被重置的岩浆锆石区域的地质年龄,即原生岩浆锆石的年龄,这个年龄说明水泉沟碱性杂岩体形成于晚泥盆世。

根据野外地质观察研究,水泉沟碱性杂岩体中部、西部被上侏罗统张家口组火山碎屑岩不整合覆盖,岩体西部的中山沟一带见有中元古代长城系白云质灰岩(已形成大理岩)捕虏体,表明碱性杂岩体侵入于中元古代地层。因此,由野外地质资料可以确定岩体侵位的上限应早于早侏罗世,但下限年龄

区间太长,为中元古代。在目前已有的岩体的年龄资料中 90% 为 K-Ar 方法取得的数据,其年龄范围为 126~257 Ma,平均年龄为 192.5 Ma(宋国瑞等,1996)。由于长石、云母、角闪石等造岩矿物的 Ar 封闭温度低于岩石的结晶温度,因此,一般情况下,K-Ar 法难以给出岩体的准确结晶年龄,特别是对于经历过多次岩浆活动、变质作用等热扰动的岩体,K-Ar 法一般给出最后一幕热扰动年龄。就本区碱性杂岩体来说,复杂的地质构造环境以及岩体发育的较明显的交代作用,特别是钾长石化,都对岩体发生强烈改造和影响,因此,K-Ar 法给出的年龄不能作为本岩体的成岩时代。全岩 Rb-Sr 等时线年龄值 748.8~260 Ma,这样大的差别表明水泉沟碱性杂岩体的 Rb-Sr 同位素体系可能未达到完全均一,或者由于岩体受到的交代蚀变作用(如钾长石化、绢云母化等)破坏了 Rb-Sr 同位素体系,使之构不成等时线或构成假等时线。在这种情况下 Rb-Sr 法也不能给出真实的成岩年龄(宋国瑞等,1996)。宋国瑞等(1996)获得水泉沟西部岩体角闪石碱性正长岩中的角闪石 Ar-Ar 年龄为 327.4 Ma。由于该区处于崇礼-赤城南侧的断裂边沿,先后受到过海西期和燕山期的构造-岩浆活动的影响,因此,Ar 有可能丢失而导致一个偏低的年龄(罗镇宽等,2001)。胡小碟等(1997)和陆松年等(1997)采用稀释法分别测得水泉沟岩体颗粒锆石 U-Pb 年龄为 (410.5 ± 1.4) Ma(中山沟角闪二长岩)和 (410.2 ± 1.1) Ma(下三道河村石英二长岩)。因为颗粒锆石还不是单颗粒锆石,他们没有对锆石进行 BSE 图像、CL 图像等研究,很可能会有个别继承锆石的混入或有变质成因的锆石核,而造成年龄数值偏大。魏菊英等(1994)和莫测辉等(1997)采用常规锆石 U-Pb 法分别获得 992 Ma(上交点年龄)和 $(1\ 718 \pm 65)$ Ma(上交点年龄)。由于水泉沟碱性杂岩体中发育大量的前寒武纪变质岩捕虏体,因此这类花岗岩类样品中可能含有不同时代的继承锆石,因而常规锆石 U-Pb 法是不可取的方法,它将产生一个比实际年龄大的年龄值,没有地质意义。梁华英等(1998)测得岩体单颗粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1 607~1 667 Ma,与前述 $(1\ 718 \pm 65)$ Ma 的上交点年龄较为一致。单颗粒锆石 U-Pb 年龄理应比常规锆石 U-Pb 年龄可靠,但如果遇到继承锆石,其弊端与常规锆石 U-Pb 法是一样的。梁华英等测定的锆石很可能是继承锆石,因此其年龄结果也偏大。

笔者采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法获得东坪金矿区水泉沟碱性杂岩体主体侵位时代为 (380.5 ± 2.6) Ma,属于晚泥盆世,这一年龄虽然与罗镇宽等(2001)获得东坪金矿区碱性杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 (390 ± 6) Ma 有近 10 Ma 左右的差值,但同为中晚泥盆世,在误差范围内年龄较为接近。考虑到东坪金矿区内碱性杂岩体受热液改造和交代作用较为强烈且普遍,岩体内又有大量的前寒武纪围岩捕虏体或包体,因此,笔者对分离出的 21 粒锆石照射了 BSE 图像和 CL 图像,并进行了 BSE 图像和 CL 图像的综合研究,然后对 17 处(排除了这些区域有个别继承锆石的混入或有变质成因的锆石核存在的可能性)具有岩浆锆石形貌特征的锆石微区

进行了 17 个点的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 单点年龄值在 378~383 Ma 之间,变化范围小,最大变化范围为 5 Ma,在误差范围内一致,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (380.5 ± 2.6) Ma($n = 15$, MSWD = 0.045,置信度 95%)。罗镇宽等(2001)仅对分离出的 25 颗锆石进行“详细的”背散射电子图像研究,但并没有附 BSE 照片,也没有 CL 照片,因此不能对锆石进行 BSE 图像和 CL 图像的综合研究,即使能保证所选的 25 颗锆石具有岩浆锆石的形貌特征,但不能保证 35 个测点附近一定没有继承锆石或变质成因的锆石或热液交代的锆石微区存在。在这三类锆石微区附近的测点会使测试的年龄结果偏大或偏小,从而得到混合的年龄数据。罗镇宽等(2001)对 25 颗锆石进行了 35 个点的分析,扣除不符合条件的 3 个点后,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 单点年龄值在 339~410 Ma 之间,最大变化范围为 71 Ma(误差范围相当大),获得 32 点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (390 ± 6) Ma。如此分散的年龄数据,不能不怀疑至少有个别测点打在了不同成因锆石微区的分界处,从而得到了个别混合的年龄结果(据笔者了解,国内某知名地质学家同样得到东坪金矿区水泉沟杂岩体相当分散的年龄数据,认为不少测点是混合年龄,而没有发表)。显然,笔者获得的 380.5 Ma 的年龄,代表东坪金矿区水泉沟碱性杂岩体的侵位年龄可能更为合理,即水泉沟碱性杂岩体形成于晚泥盆世。

4.2 东坪金矿成矿时代

石英脉型金矿的围岩蚀变强度一般较弱,从中挑选出适合于常规同位素定年方法的矿物不太容易。早期人们常利用矿体与赋矿岩石(如地层、岩体等)的相互关系来间接确定成矿时代。由于赋矿岩石与矿床之间有时并不一定存在成因上的联系,仅根据赋矿地质体的年龄来间接推断成矿时代很可能得出错误的结论(Li, 2006)。因此,要准确限定石英脉型金矿床的成矿时代,需要直接测定与金矿成矿有关的热液蚀变矿物或矿石矿物的同位素年龄。近十几年来陆续有关于石英脉型金矿床中发现热液锆石的报道(Hu et al., 2004; Claué-Long et al., 1990; Kerrich, 1993),研究表明锆石可以直接从中低温热液流体中生长结晶(Cherniak et al., 2003; Dempster et al., 2004; Dubinska et al., 2004),这些热液锆石形成的温压条件与含金石英脉的形成条件极为相似。因此,通过寻找含金石英脉中的热液锆石,利用锆石微区 U-Pb 定年,可以确定金矿床的形成时代,可以为石英脉型金矿床的直接定年提供新途径。

东坪金矿 1 号脉具有钾长石-绿泥石-绿帘石-绢云母-石英-钠长石矿化蚀变组合,表明矿化作用发生在绿片岩相($< 450^\circ\text{C}$)的中低温条件下(朱永峰等,2006)。在 BSE 图像上呈亮灰白色的浅色锆石区域,多发育在岩浆锆石中,具有明显不规则状的交代结构(见图 2),在 CL 图像上对应区域则呈暗黑-深灰色(具无阴极发光特征)(见图 3),这些锆石微区的 Th/U 比值以及 Th 和 U 含量明显偏高,并且变化范围很大,其中 $\alpha(\text{Th})$ 为 $(494 \sim 16\ 202) \times 10^{-6}$,平均 $8\ 072 \times 10^{-6}$;

$\alpha(U)$ 为 $(494 \sim 16\ 202) \times 10^{-6}$, 平均 $8\ 072 \times 10^{-6}$; Th/U 比值范围为 $0.16 \sim 1.9$, 平均 1.15 , 远远大于 0.1 。特别是同在一颗锆石中的 5-2 号测点 Th 含量是 5-1 号的 305 倍, 其 U 含量是后者的 45 倍; 10-2 号是 10-1 号测点 Th 含量的 56 倍, U 含量的 14 倍, 表明原生岩浆锆石经过热液交代改造作用后使得 Th、U 等元素在改造的锆石区域极大富集, 个别情况下还可以形成新生的锆石增生边(例如, 图 3 中 10-2 号和 10-1 号测点所在的锆石外边)。这些特征与澳大利亚 Boggy Plain 岩体中的热液锆石和中国新疆天格尔糜棱岩化花岗岩以及新疆成水泉片麻状花岗岩热液锆石增生边具有非常相似的特征, 表明这些区域属于热液锆石(Hoskin, 2005; 朱永峰等, 2006; 唐俊华等, 2007)。具有热液交代特征的热液锆石, 它们是通过后期富含 Zr 和 U、Th 等的热液流体交代或改造原生岩浆锆石, 结果导致不规则状锆石区域或锆石边缘 U-Pb 体系的完全重置, 这个年龄记录了热液活动的年龄(吴元保等, 2004; 朱永峰等, 2006; 唐俊华等, 2007)。笔者这次得到的热液锆石成分点均分布在 U-Pb 年龄谱和曲线上或附近, 9 个测点的加权平均年龄为 (140.2 ± 1.3) Ma, 表明在水泉沟碱性正长岩形成以后, 在燕山中晚期又经历了一次重要的有热液流体参与的改造事件, 这个年龄记录了碱性杂岩体形成以后在碱性杂岩体周边部又有一次广泛而强烈的热液活动, 即中细粒正长岩中形成的钾长石石英脉的侵位年龄或东坪金矿的成矿年龄为 (140.2 ± 1.3) Ma。

不同研究者曾利用不同方法对东坪金矿进行了成矿年龄的测定, 获得了一大批数据, 但由于欠缺高精度锆石矿物微区年代学资料, 所测年龄数据参差不齐, 成矿年龄数据比较分散($120 \sim 350.9$ Ma), 结果导致对东坪金矿的成矿时代有燕山期、印支期、海西期等。本文获得成矿年龄为 (140.2 ± 1.3) Ma, 厘定了东坪金矿主要成矿年代为早白垩世, 这一年龄与中国东部燕山期成矿大爆发(邓晋福等, 1999; 华仁民等, 1999; 毛景文等, 1999)和中国北方中生代存在 3 大成矿期次 $200 \sim 160$ Ma、 140 Ma 和 120 Ma 的观点(毛景文等, 2003b; 2005; 翟明国等, 2003)一致。另外, Hart 等(2002)利用 Ar-Ar 法测定东坪金矿 70 号脉中的 2 个绢云母样品得到 (153 ± 3) Ma 和 (152 ± 3) Ma 的年龄数据, 这两个较为一致的年龄代表东坪地区热液活动形成矿脉中的热液蚀变矿物绢云母的蚀变年龄, 证实了晚侏罗世东坪金矿的成矿事件。考虑到 152 Ma 左右的年龄与笔者测到的 (140.2 ± 1.3) Ma 的年龄较为接近, 说明东坪金矿可能存在多阶段成矿的特点, 即东坪金矿是由晚侏罗世—早白垩世期间多阶段成矿作用形成的。

4.3 成岩与成矿的关系

毛景文等(毛景文等, 2001; Mao et al., 2003a)对东坪金矿 1 号和 70 号主矿脉进行了石英流体包裹体样品测定, 测定结果表明, 包裹体富 CO_2 , 均一温度为 $250 \sim 400^\circ C$, 主要集中于 $280 \sim 360^\circ C$, 压力范围为 $40 \sim 180$ MPa, 这些条件与上述讨论形成热液锆石的条件相近。另外, He-Ar 同位素测试结果表明, 东坪金矿床中成矿流体有明显的地幔物质参与, 其

R/Ra 比值为 $0.3 \sim 5.2$, 高于地壳物质(0.001)百倍以上。再者, 东坪金矿属于碲化物金矿床, 碲是亲地幔与地核元素。因此, 东坪金矿碲富集、高 R/Ra 比值和 CO_2 流体等特征可视为地幔流体参与成矿的重要标志。

本文采用 LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 法获得东坪金矿的围岩中细粒正长岩年龄为 (380.5 ± 2.6) Ma, 代表金矿成矿年龄的热液锆石年龄为 (140.2 ± 1.3) Ma, 成岩与成矿年龄相差 240 Ma, 表明东坪金矿床的形成与围岩中细粒正长岩岩浆侵位事件无直接关系。另外, 矿区东边的温泉巨斑状花岗岩 Rb-Sr 年龄为 (658.36 ± 90.30) Ma(宋国瑞等, 1996), 水泉沟杂岩体北部的红花梁黑云母花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (235 ± 2) Ma(Jiang et al., 2007), 位于水泉沟杂岩体西南部的谷嘴子斑状花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (236 ± 2) Ma(Miao et al., 2002), 这些花岗岩的年龄均远大于东坪金矿 140.2 Ma 或 $152 \sim 153$ Ma 的成矿年龄, 显然这些岩体也与东坪金矿无直接成因联系。但是, 有地幔流体参与成矿的东坪金矿, 其成矿热液到底来源于何处呢? 本文借助于 BSE 图像显示的热液交代锆石十分发育(见图 2), 东坪金矿田的规模又特别大(达特大型)等现象, 推测其热液来源规模十分巨大。最近, 韦忠良等(2008)对张家口地区的张家口组火山岩用锆石 LA-ICP-MS 测年, 年龄范围为 $(143.0 \pm 3.7) \sim (136.1 \pm 1.4)$ Ma, 表明在西部(张家口地区)火山作用开始的时间较早(143 Ma), 持续的时间较长($143 \sim 136$ Ma), 这一结果与笔者测定的东坪金矿热液锆石的年龄 (140.2 ± 1.3) Ma 十分吻合, 考虑到张家口组中酸性火山岩在碱性杂岩体附近的西部和东坪金矿东南部约 $3.4 \sim 4$ km 处广泛分布, 笔者认为张家口组中酸性火山岩的火山活动可能为东坪金矿成矿提供了重要的热源和成矿流体(相当于地幔成分的流体)。另外, 位于东坪金矿区东南约 3 km 的上水泉钾长花岗岩岩体, 出露面积约 8 km², 由于该岩体与东坪金矿有密切的空间关系, 因此不少学者认为东坪金矿有可能与该岩体有成因联系。Miao 等(2002)获得上水泉花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (142.2 ± 1.3) Ma。最近, Jiang 等(2009)对上水泉花岗岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年, 获得了 (142.9 ± 0.8) Ma 的年龄。这两个年龄结果在误差范围内一致且与笔者测定的东坪金矿热液锆石的年龄 (140.2 ± 1.3) Ma 接近。上水泉花岗岩仅早于东坪金矿 1 号脉 2 Ma 左右, 表明该岩体也可能与东坪金矿有成因联系。位于水泉沟碱性杂岩体东部的转枝莲暗灰色闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (139.5 ± 0.9) Ma(Jiang et al., 2007), 此年龄在误差范围内与东坪金矿 1 号脉的年龄一致, 表明转枝莲闪长岩可能与东坪金矿成矿有联系。此外, 不排除矿床周围燕山中酸性岩脉、小型侵入体或隐伏岩体等为金矿提供了热源、深部热液和部分矿质的可能性。因此, 笔者认为东坪金矿的成矿热源主要来自于晚侏罗世—早白垩世期间的火山活动或(和)矿体周围的小型侵入体或隐伏岩体的热液活动。

考虑到本区众多金矿点产于中细粒正长岩中, 并且碱性

杂岩体含金量较高,达 $5 \times 10^{-9} \sim 17 \times 10^{-9}$ (宋国瑞等, 1996) 因此不排除燕山中晚期来自深部的热液流体或熔体从碱性杂岩体中萃取了部分成矿金属元素,在适宜的空间(如 NNE 向、NE 向断裂系统)适宜的物理化学条件(弱碱性)下卸载成矿。从这层意义上讲,碱性杂岩体对东坪金矿的成矿作用会有一定影响。

5 结 论

通过对河北省张宣地区东坪特大型金矿床含金石英脉中的锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 年龄研究,得出以下几点认识。

(1) 东坪金矿 1 号脉中的钾长石石英脉受热液改造和交代作用比较普遍。但是在受交代蚀变的锆石中仍有保留锆石 U-Pb 体系未被重置的区域,对这些锆石微区进行 U-Pb 定年,仍能得到反映原生锆石形成的地质年龄。本文得到的在 BSE 图像上呈暗灰色区域锆石的年龄为 $(380.5 \pm 2.6) \text{ Ma}$, 这个年龄代表了保留在锆石中 U-Pb 体系未被重置的岩浆锆石微区的地质年龄,即水泉沟碱性杂岩体主体侵位的时代为晚泥盆世。

(2) 东坪金矿含金石英脉中的热液锆石多呈不规则状充填在岩浆锆石中,部分呈他形粒状颗粒独立存在。热液锆石在 BSE 图像上呈亮灰白色,在 CL 图像上为深黑色(无阴极发光)。热液锆石的 Th、U 含量和 Th/U 比值较岩浆锆石明显增高,9 个测点 U-Pb 加权平均年龄为 $(140.2 \pm 1.3) \text{ Ma}$, 这个年龄说明东坪金矿形成于早白垩世,另外, Hart 等(2002)用 Ar-Ar 法测定东坪金矿中的绢云母得到 152 Ma 左右的年龄数据,与笔者测到的 140 Ma 较为接近,说明东坪金矿可能存在多阶段成矿的特点。

(3) 东坪金矿区的围岩中细粒正长岩年龄为 $(380.5 \pm 2.6) \text{ Ma}$, 代表金矿成矿年龄的热液锆石年龄为 $(140.2 \pm 1.3) \text{ Ma}$, 成岩与成矿年龄相差近 240 Ma, 表明东坪金矿床的形成与围岩中细粒正长岩岩浆侵位事件无直接关系。通过对矿区区域地质背景的综合分析,笔者认为东坪金矿成矿流体可能与该区晚侏罗世—早白垩世期间的火山活动或(和)矿体周围的小型侵入体或隐伏岩体的热液活动有关。

志 谢 在野外地质调查过程中得到东坪金矿地测科同行们提供的诸多帮助,本文在成文过程中得到毛景文教授、陆松年研究员提出的诸多建设性意见,评审专家提出了十分有益的修改意见,在此一并致谢!

References

Andersen T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analysis that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59-79.

Bao Z W, Zhao Z H, Zhang P H and Wang Y X. 2003. REE, Sr, Nd,

and Pb isotopic evidence for the petrogenesis of the Shuiquangou syenite complex in NW Hebei Province, China [J]. *Geological Review*, 49(6): 621-627 (in Chinese with English abstract).

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]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 143: 602-622.

Cherniak D J and Watson E B. 2003. Diffusion in zircon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 113-143.

Claué-Long J C, King R W and Kerrich R. 1990. Archaean hydrothermal zircon in the Abitibi greenstone belt: Constraints on the timing of gold mineralisation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 98(1): 109-128.

Dempster T J, Hay D C and Bluck B J. 2004. Zircon grows in slat [J]. *Geology*, 32: 221-224.

Deng J F, Mo X X, Zhao H L, Luo Z H, Zhao G C and Dai S Q. 1999. The Yanshanian lithosphere-asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in east China [J]. *Mineral Deposits*, 18(4): 309-315 (in Chinese with English abstract).

Dubinska E, Bylina P and Kozłowski A. 2004. U-Pb dating of serpentinization: Hydrothermal zircon from a metasomatic rodingite shell (Sudetic ophiolite, SW Poland) [J]. *Chemical Geology*, 203(3-4): 183-203.

Hart C J R, Goldfarb R J, Qiu Y, Snee L W, Miller L D and Miller M L. 2002. Gold deposits of the northern margin of the North China craton: Multiple late Paleozoic-Mesozoic mineralizing events [J]. *Mineralium Deposita*, 37: 326-351.

Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic Petrogenesis [A]. In: Hancher J M, Hoskin P W O, eds. *Zircon, reviews in mineralogy and geochemistry* [C]. *Mineralogical Society of America*, 53: 27-62.

Hoskin P W O. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69(3): 637-648.

Hu F F, Fan H R, Yang J H, Wan Y S, Liu D Y, Zhai M G and Jin C W. 2004. Mineralizing age of the Rushan lode gold deposit in the Jiaodong Peninsula: SHRIMP U-Pb dating on hydrothermal zircon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1629-1636.

Hu X D, Chen Z H, Zhao Y M and Wang K Y. 1997. The metallogenic epoch of the Xiaoyingpan gold deposit—the new material of U-Pb isotopic age on single zircon [J]. *Progress in Precambrian Research*, 20(2): 22-28 (in Chinese with English abstract).

Hua R M and Mao J W. 1999. A preliminary discussion on the mesozoic metallogenic explosion in east China [J]. *Mineral Deposits*, 18(4): 300-307 (in Chinese with English abstract).

Jiang N. 2005. Petrology and geochemistry of the Shuiquangou syenitic complex, northern margin of the North China Craton [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 162: 203-215.

Jiang N, Liu Y S, Zhou W G, Yang J H and Zhang S Q. 2007. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China craton [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 71: 2591-2608.

- Jiang N, Zhang S Q, Zhou W G and Liu Y S. 2009. Origin of a Mesozoic granite With A-type characteristics from the North China craton: Highly fractionated from I-type magmas[J]? *Contrib. Mineral. Petrol.*, 158: 113-130.
- Jiang S H and Nie F J. 2003. Nd-isotope constraints on origin of the Shuiquangou intrusive complex, North-Western Hebei, China[J]. *Geological Review*, 49(4): 355-360(in Chinese with English abstract).
- Kerrick R. 1993. Hydrothermal zircon and baddeleyite in Val-d'Or Archean mesothermal gold deposits: Characteristics, compositions, and fluid-inclusion properties, with implications for timing of primary gold mineralization[J]. *Canada Journal of Earth Sciences*, 30: 2334-2351.
- Li C M. 1999. Relationship between the gold source of Dongping gold deposit and archaic TTG-greenstone belt[J]. *Progress in Precambrian Research*, 22(1): 40-46(in Chinese with English abstract).
- Li J W, Vasconcelos P M and Zhou M F. 2006. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan gold deposits, eastern Jiaodong gold province, northeastern China: Implications for regional mineralization and geodynamic setting[J]. *Econ. Geol.*, 101: 1023-1038.
- Liang H Y, Mo C H and Wang X Z. 1998. Single zircon Pb-evaporation $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of the gold-bearing Shuiquangou alkaline rock in Zhangjiakou area, Hebei Province, China[J]. *Geochimica*, 27(1): 59-65(in Chinese with English abstract).
- Liati A, Gebauer D and Wysoczanski R. 2002. U-Pb SHRIMP-dating of zircon domains from UHP garnet-rich mafic rocks and late pegmatoids in the Rhodope zone (N Greece): Evidence for early Cretaceous crystallization and late Cretaceous metamorphism[J]. *Chem. Geology*, 184: 281-299.
- Lu D L, Luo X Q, Wang J J, Zhang S H and Zheng B Y. 1993. The metallogenic epoch of the Dongping gold deposit[J]. *Mineral Deposits*, 12(2): 182-188(in Chinese with English abstract).
- Lu S N, Li H K, Li H M, Yang C L, Hu Z D and Jiang M M. 1997. Study on the precambrian basement and mineralization in the gold-concentrated region[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 41-44(in Chinese).
- Ludwig K R. 2001. *Squid 1.02: A user manual*[M]. Berkeley Geochronological Center Special Publication. 219.
- Luo Z K, Miao L C, Guan K, Qiu Y S, Qiu Y M, McNaughton N J and Groves D I. 2001. SHRIMP chronological study of Shuiquangou intrusive body in Zhangjiakou area, Hebei Province and its geochemical significance[J]. *Geochimica*, 30(2): 116-122(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Hua R M and Li X B. 1999. A Preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits[J]. *Mineral Deposits*, 18(4): 291-299(in Chinese with English abstract).
- Mao J W and Li Y Q. 2001. Fluid Inclusions of the Dongping gold telluride deposit in Hebei Province, China: Involvement of mantle fluid in metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 20(1): 23-36(in Chinese with English abstract).
- Mao J W and Li Y Q. 2003a. Fluid inclusion and noble gas studies of the Dongping gold deposit, Hebei Province, China: A mantle connection for mineralization[J]? *Econ. Geol.*, 98: 517-534.
- Mao J W, Zhang Z H, Yu J J, Wang Y T and Niu B G. 2003b. Geodynamic setting of Mesozoic large-scale mineralization in the North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. *Science in China (Series D)*, 33(4): 289-299(in Chinese).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 170-188(in Chinese with English abstract).
- Miao L C, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I, Zhai Y S, Fan W M, Zhai M G and Guan K. 2002. SHRIMP U-Pb Zircon geochronology of granitoids from Dongping area, Hebei Province, China: Constraints on tectonic evolution and geodynamic setting for gold metallogeny[J]. *Ore Geol. Rev.*, 19: 187-204.
- Mo C H, Liang H Y, Wang X Z, Cheng J P and Li H M. 1997. Zircon U-Pb dating of the Shuiquangou intrusive complex, north-western Hebei, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(1): 75-77(in Chinese).
- Mo C H, Wang X Z, Liang H Y and Cheng J P. 1998. Single zircon U-Pb dating of Shangshuiquan granite, Dongping gold deposit, Hebei Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 18(3): 298-302(in Chinese with English abstract).
- Shao J A, Wei C J, Zhang L Q, Niu S Y and Mu B L. 2004. The Zhuanzhilian pyroxene diorite in core of Zhuang-Xuan upwar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1389-1396(in Chinese with English abstract).
- Shen B F, Lu S N, Yang C L, Li J J, Mao D B and Li H K. 1997. The forecasting theory and method of the metallogenic focus-area-Example by the gold deposits of North China Platform[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 6-81(in Chinese with English abstract).
- Simon E, Jackson, Norman J, Pearson and William L. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211: 47-69.
- Song G R and Zhao Z H. 1996. Geology of Dongping alkaline complex-hosted gold deposit in Hebei Province[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-181(in Chinese).
- Tang J H, Gu L X, Zhang Z Z, Wu C Z, San J Z, Wang C S, Liu S H and Zhang G H. 2007. Characteristics, age and origin of the Xian-shuiquan gneissose granite in eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1803-1520(in Chinese with English abstract).
- Tomaschek F, Kennedy A K and Villa I M. 2003. Zircons from Syros, Cyclades, Greece-recrystallization and mobilization of zircon during high-pressure metamorphism[J]. *Journal of Petrology*, 44(11): 1977-2002.
- Wang X, Chen J and Luo D. 2008. Study on petrogenesis of zircons from the Danzhu granodiorite and its geological implications[J]. *Geological Review*, 54(3): 387-398(in Chinese with English ab-

stract).

Wei J Y and Su Q. 1994. Geochemistry characteristics of Shuiquangou rock body in Dongping gold ore district, Hebei Province [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 29(3): 256-266 (in Chinese with English abstract).

Wei Z L, Zhang H, Liu X M and Zhang Y Q. 2008. LA-ICP-MS geochronology of volcanics of the Zhangjiakou Formation in Zhangjiakou area, Hebei Province and its geological significance [J]. *Progress in Nature Science*, 18(5): 523-530 (in Chinese).

Wu Y B and Zhen Y F. 2004. The research of the genesis mineralogy of zircon and the restriction to the explanation of the U-Pb dating [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604 (in Chinese).

Zhai M G, Zhu R X, Liu J M, Men Q R, Hou Q L, Hu S B, Li Z, Zhang H F and Liu W. 2003. The critical time limit of Mesozoic tectonic regime transformation in eastern north China [J]. *Science in China (Series D)*, 33(10): 913-929 (in Chinese).

Zhang Z C and Chen H X. 1997. Geology and petrology of Shuiquangou complex, northern Hebei Province [J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 6(2): 81-92 (in Chinese with English abstract).

Zhu Y F and Song B. 2006. Petrology and SHRIMP chronology of mylonitized Tianger granite, Xinjiang: Also about the dating on hydrothermal zircon rim in granite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 135-144 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

包志伟, 赵振华, 张佩华, 王一先. 2003. 张家口水泉沟正长岩杂岩体成因的 REE 和 Sr、Nd、Pb 同位素证据 [J]. *地质论评*, 49(6): 621-627.

邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 罗照华, 赵国春, 戴圣潜. 1999. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境 [J]. *矿床地质*, 18(4): 309-315.

胡小蝶, 陈志宏, 赵彦明, 王魁元. 1997. 河北小营盘金矿成矿时代--单颗粒锆石 U-Pb 同位素年龄新证据 [J]. *前寒武纪研究进展*, 20(2): 22-28.

华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发 [J]. *矿床地质*, 18(4): 300-307.

江思宏, 聂凤军. 2003. 冀西北水泉沟杂岩体成因的 Nd 同位素证据 [J]. *地质论评*, 49(4): 355-360.

李长民. 1999. 东坪金矿金质来源与张宣地区花岗岩-绿岩地体的关系探讨 [J]. *寒武纪研究进展*, 22(1): 40-46.

梁华英, 莫测辉, 王秀璋. 1998. 张家口水泉沟碱性杂岩体单颗粒锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分析 [J]. *地球化学*, 27(1): 59-65.

卢德林, 罗修泉, 汪建军, 张思红, 郑宝英. 1993. 东坪金矿成矿时代研究 [J]. *矿床地质*, 12(2): 182-188.

陆松年, 李怀坤, 李惠民, 杨春亮, 胡正德, 蒋明媚. 1997. 金矿床密集区的基底特征及成矿作用研究 [M]. 北京: 地质出版社. 41-4.

罗镇宽, 苗来成, 关康, 裘有守, Qiu Y M, Mc Naughton N J, Groves D I. 2001. 河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义 [J]. *地球化学*, 30(2): 116-122.

毛景文, 华仁民, 李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区 [J]. *矿床地质*, 18(4): 291-299.

毛景文, 李荫清. 2001. 河北省东坪磅化物金矿床流体包裹体研究: 地幔流体与成矿关系 [J]. *矿床地质*, 20(1): 23-36.

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期次及其地球动力学背景 [J]. *岩石学报*, 21(1): 170-188.

毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003b. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精确得到启示 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 33(4): 289-299.

莫测辉, 梁华英, 王秀璋, 程景平, 李惠民. 1997. 冀西北水泉沟碱性杂岩体锆石 U-Pb 定年 [J]. *科学通报*, 42(1): 75-77.

邵济安, 魏春景, 张履桥, 牛树银, 牟保磊. 2004. 张宣隆起核部的转枝莲辉石闪长岩 [J]. *岩石学报*, 20(6): 1389-1396.

沈保丰, 陆松年, 杨春亮, 李俊建, 毛德宝, 李怀坤. 2000. 矿床密集区预测的理论和方法 (以华北地台为例) [M]. 北京: 地质出版社. 42-48.

宋国瑞, 赵振华. 1996. 河北省东坪碱性杂岩金矿地质 [M]. 北京: 地震出版社. 1-181.

唐俊华, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 三金柱, 汪传胜, 刘四海, 张光辉. 2007. 东天山咸水泉片麻状花岗岩特征、年龄及成因 [J]. *岩石学报*, 23(8): 1803-1520.

汪相, 陈洁, 罗丹. 2008. 浙西南淡竹花岗闪长岩中锆石的成因研究及其地质意义 [J]. *地质论评*, 54(3): 387-398.

韦忠良, 张宏, 柳小明, 张晔卿. 2008. 张家口地区张家口组火山岩的 LA-ICP-MS 测年及其地质意义 [J]. *自然科学进展*, 18(5): 523-530.

魏菊英, 苏琪. 1994. 河北东坪金矿区水泉沟岩体的地球化学特征 [J]. *地质科学*, 29(3): 256-266.

吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解的制约 [J]. *科学通报*, 49(16): 1589-1604.

翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 候泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时期 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 33(10): 913-929.

张招崇, 陈洪新. 1997. 水泉沟杂岩体的地质学和岩石学研究 [J]. *贵金属地质*, 6(2): 81-92.

朱永峰, 宋彪. 2006. 新疆天格尔糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究: 兼论花岗岩中热液锆石边的定年 [J]. *岩石学报*, 22(1): 135-144.