

河北省东坪金矿钾质蚀变岩中的两期锆石 年代学研究及意义

李长民¹⁾, 邓晋福¹⁾, 苏尚国¹⁾, 李惠民²⁾, 刘新秒²⁾

1) 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2) 天津地质矿产研究所, 天津 300170

摘 要: 河北省崇礼县东坪金矿位于水泉沟碱性杂岩体内, 金矿石包括低硫化物石英脉型和钾质蚀变岩型两种类型。本次工作我们对采自东坪金矿 70 号脉深部的钾质蚀变岩中的锆石进行了成因矿物学和成矿年代学研究, 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, 在背散射电子图像(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, 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 382.8 ± 3.3 Ma。热液锆石多呈不规则状充填在岩浆锆石中, 在 BSE 图像上呈亮灰白色, 在 CL 图像上为深黑色(无阴极发光), 锆石的 Th、U 含量和 Th/U 比值较岩浆锆石明显增高, 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 140.3 ± 1.4 Ma, 说明东坪金矿形成于早白垩世。140 Ma 成矿年龄的发现, 为认识河北省东坪金矿的成矿时代提供了新证据, 具有重要的地质意义。

关键词: 钾质蚀变岩; 锆石 U-Pb 定年; 岩浆锆石; 热液锆石; 东坪金矿; 河北省

中图分类号: P618.51; P588.32; P597.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2010)06-843-10

Two Stage Zircon U-Pb Ages of the Potash Altered Rock in the Dongping Gold Deposit, Hebei Province, and Their Geological Implications

LI Chang-min¹⁾, DENG Jin-fu¹⁾, SU Shang-guo¹⁾, LI Hui-min²⁾, LIU Xin-miao²⁾

1) State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2) Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170

Abstract: Located in Chongli County of Hebei Province, the Dongping gold deposit is hosted by the Shuiquanguo alkaline complex. There are two types of gold ores in this ore deposit, namely the low-sulfide quartz veins and the intense k-feldspar alteration type. In this paper, the authors made a mineralogical and U-Pb geochronologic study of the zircons from the intense k-feldspar alteration of No.70 vein. Two types of zircons were recognized, i.e., magmatic and hydrothermal ones. The magmatic zircons are characterized by euhedral-subhedral crystals, dark gray color on the backscattered electron (BSE) image, and clear magmatic oscillatory zoning on cathodeluminescence (CL) image. The U-Pb analytical data of the magmatic zircons indicate a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 382.8 ± 3.3 Ma. The hydrothermal zircons are mainly of irregular form filled with magmatic zircons. The hydrothermal zircons show light grayish white color on the BSE image and dark black color (non-luminescent) on the CL image. Compared with the magmatic zircons, the hydrothermal zircons have much higher Th, U content and Th/U ratios. The LA-ICP-MS zircon U-Pb age is 140.3 ± 1.4 Ma. It is suggested that the Dongping gold deposit formed in the early Cretaceous. The discovery of the 140 Ma ore-forming age provides new evidence for the metallogenic epoch of the Dongping gold deposit.

Key words: intense k-feldspar-altered rock; zircon U-Pb dating; magmatic zircon; hydrothermal zircon; Dong-

本文由国家自然科学基金重点项目(编号: 40234048)、全国重要矿产成矿地质背景研究(编号: 1212010633902)和中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室项目(编号: GPMR0735)联合资助。

收稿日期: 2010-06-17; 改回日期: 2010-08-17。责任编辑: 魏乐军。

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

ping gold deposit; Hebei Province

河北省张家口、宣化地区(简称张宣地区,下同)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质蚀变岩型和钾长石石英脉型金矿床。金矿床的围岩为中细粒正长岩。矿化由一系列平行排列的走向 $0^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的矿脉群组成,其中1号脉和70号脉是最大的两条矿脉,约占全矿区金储量的80%。东坪金矿一个十分重要的特点是主成矿期的钾长石化蚀变特别强烈,表现为钾长石、玉髓、绢云母、致密状石英等强烈交代中细粒正长岩构成硅钾质蚀变岩,这些蚀变岩也都含金,是金矿体的一部分。因此,不少研究者采集了含金钾长石蚀变岩中的钾长石样品,试图通过K-Ar法和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法获得钾质蚀变岩的形成年龄,以便了解金矿的成矿时代。但由于很少采用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(120~350.9 Ma)(陆松年等,1997;宋国瑞等,1996),从而导致人们对金矿的成因认识上有较大分歧。为了解决东坪金矿的成矿时代,重新厘定金矿围岩中细粒正长岩的成岩时代,我们对采自70号脉深部的含金钾质蚀变岩样品进行了LA-ICP-MS 锆石微区U-Pb测年,以探讨金矿的成矿时代、中细粒正长岩的精确年龄以及金矿与围岩中细粒正长岩的成因联系。

1 地质概况

河北省张宣地区东坪金矿田位于华北克拉通北缘中段的崇礼-赤城深大断裂以南10 km处。以近东西向的崇礼-赤城深大断裂为界,北部为古元古代红旗营子群变质杂岩,南部为太古代桑干群变质杂岩和中新元古代未变质的沉积盖层以及中生代火山岩和火山碎屑岩的分布区域,见图1(b)。其中太古宙桑干群变质杂岩主要由TTG质片麻岩和其中的各类表壳岩捕虏体组成,经历了角闪岩相-麻粒岩相变质作用。红旗营子群变质杂岩主要为古元古代地层组成,经受了角闪岩相变质作用和强烈的变形作用,分布有花岗质深成侵入体。中新元古代未变质的沉积盖层仅见于图1(b)的东南角,主要由长城系的浅海相碎屑岩、碳酸盐岩沉积岩系组成。上侏罗统张家口组主要由酸性、中酸性火山岩、火山碎屑岩组成,主要分布在水泉沟杂岩体西部和东坪金矿的东南侧,以不整合形式覆盖在前寒武纪地层与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法测得张家口地区张家口组火山岩的年龄范围为143~136 Ma,属早白垩世陆相火山沉积建造。

水泉沟碱性杂岩体呈近东西向狭长带状出露。岩体东西长约55 km,南北宽5~8 km,面积约350 km²。该岩体的北、南、东部出露有红花梁黑云母花岗岩、上水泉钾长花岗岩和温泉巨斑状花岗岩(宋国瑞等,1996),见图1(b)。组成碱性杂岩体的岩石类型有辉石闪长岩、角闪二长岩、角闪正长岩、辉石角闪正长岩、石英二长岩、碱性正长岩、石英碱长正长岩和部分碱长花岗岩等。其中中细粒正长岩类与中粗粒(辉石)角闪正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Sr、Nd、Pb、O同位素综合研究表明水泉沟碱性杂岩体是来源于富集的上地幔与下地壳局部熔融的物质不均匀混合作用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)。

东坪金矿的直接围岩为水泉沟中细粒碱性正长岩杂岩体,矿石组分以富含碲为特征,属于碲化物金矿床(Mao et al., 2003)。由于区内绝大多数金矿体(脉)分布在水泉沟碱性正长岩的内外接触带,据此多数学者推测东坪金矿床与碱性正长岩体有直接的时空和成因联系(王郁等,1994;宋国瑞等,1996;陆松年等,1997)。

东坪金矿主要由一系列平行排列的走向NNE、NE和NW向的矿脉组成。金矿石主要包括低硫化物碲金石英脉型和含金钾质蚀变岩型两种类型,其中钾质蚀变岩型金矿分布范围更广,所占金矿石比例更大,这些蚀变带也都含金,是金矿体的一部分(Mao et al., 2003)。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。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329~337℃;(2)黄铁矿-金-石英脉期,是金的主要矿化期之一,均一温度为315~324℃;(3)多金属硫化物-金-石英脉期,为金的最主要矿

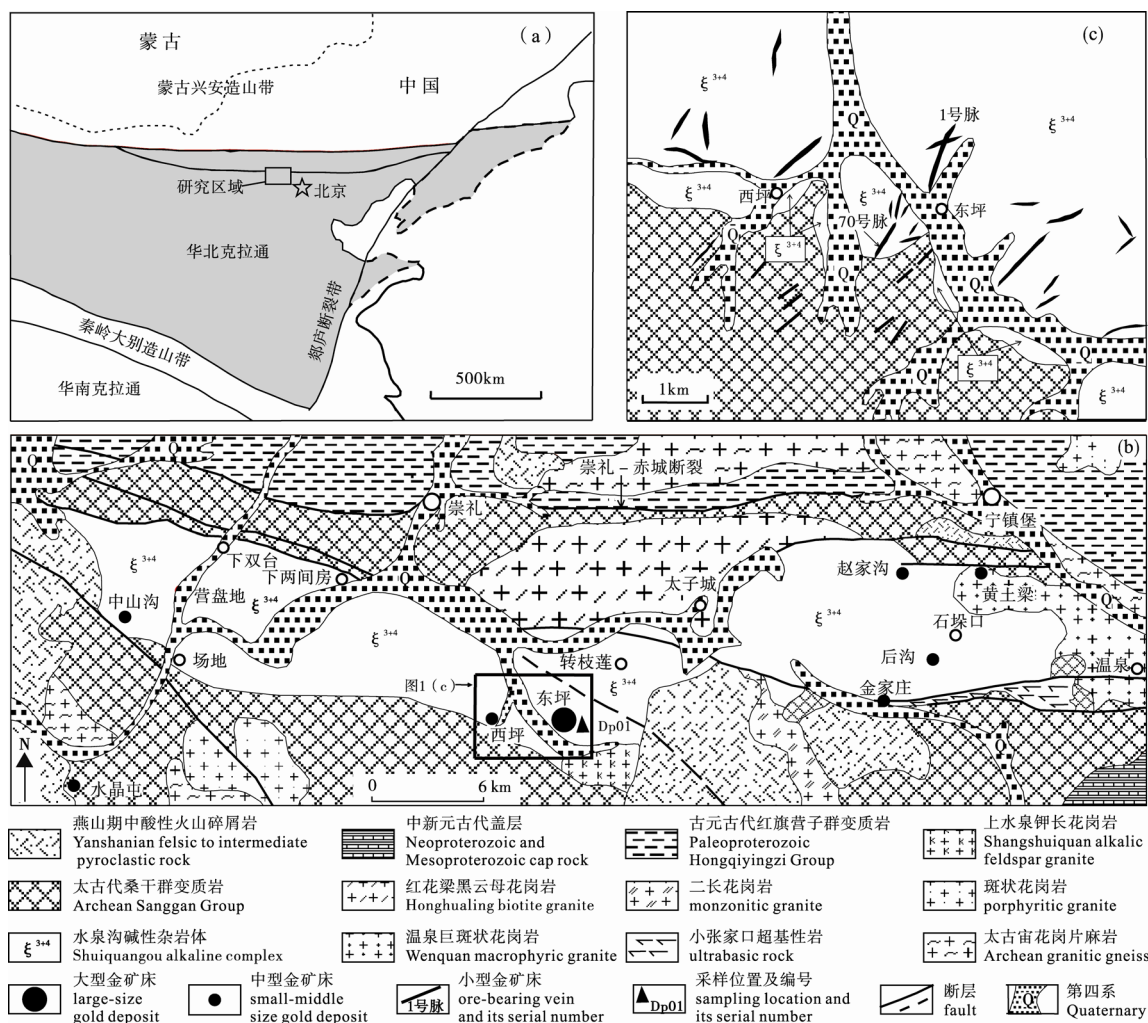


图 1 水泉沟碱性杂岩体及金矿床区域地质图
Fig. 1 Simplified geological map of Shuiquangou alkaline complex in Zhangjiakou area, Hebei Province
a-研究区大地构造位置图; b-水泉沟杂岩体地质图; c-东坪金矿地质图
a-Tectonic location map of the study area; b-The geological map of the Shuiquangou alkaline complex;
c-Geological map of the Dongping gold deposit

化期, 均一温度为 244 ~ 285 ; (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 ~ 185 ; (5)重晶石 - 碳酸盐 - 石英细脉期。其中 (4)、(5)两期热液活动极弱。

东坪金矿一个十分显著的特点是主成矿期第三期钾长石化特别强烈(卢德林等, 1993), 表现为钾长石、灰白色致密状石英交代中细粒霓辉正长岩, 构成硅钾质蚀变岩, 钾质蚀变作用强烈处往往形成钾长石岩包囊或钾长伟晶岩(含一定量的石英)。第三期以后的热事件规模都极小, 而且温度很低, 为 150 ~ 185 或更低。矿体极少被后期断层切割, 即使有错断, 断距也很小, 表明东坪金矿主成矿期后的热事件干扰是很弱的(卢德林等, 1993)。

前人对东坪金矿进行了广泛的年代学研究, 所

得年龄很不一致, 早至元古宙, 晚至中生代。因此, 就有元古宙、海西期、印支-燕山期不同时代成矿的争议。为了更可靠地确定东坪金矿的成矿年龄, 作者对采自东坪金矿 70 号脉深部的钾质蚀变岩中的锆石进行了 LA-ICP-MS 定年, 以确定东坪金矿可靠的成矿年龄(详见后述)。

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(CL images)在中国地质科学院地质研究所电镜室完成。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。

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 cm^3 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 等人(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,氦气流速 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 5Hz,测试脉冲能量为 $10\sim 20\text{ J/cm}^2$,剥蚀直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。

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 校正使用 Andersen(2002)的方法,我们使用 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 锆石特征和分析结果

样品的采集对成矿时代研究至关重要,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体的形成时代,作者在东坪金矿 70 号脉深部坑道中采集了主成矿期的第三期含金硅钾质蚀变岩样品,样品编号 DP01。

DP01 号样采自东坪金矿 70 号脉深部的硅钾质蚀变岩(钾长石化中细粒霓辉正长岩),由于强烈的钾长石化,现已变为肉红色钾长石岩,样重 10 kg 左

右,岩石具有强钾长石化、硅化、弱绢云母化、绿泥石化。薄片观察钾长石岩具有它形-半自形状、粗粒-巨晶状结构,粒径 $5\sim 35\text{ mm}$,主要由微斜长石(65%~80%)和微斜条纹长石(15%~20%)组成,含少量细粒($0.3\sim 1.8\text{ mm}$)斜长石(5%~7%, $\text{An}_{12\pm}$)、石英(5%~8%),副矿物有磷灰石、榍石、锆石、磁铁矿等。可见斜长石具有交代熔蚀结构和钠长石化现象。从样品中挑选锆石颗粒大于 1000 粒,在双目镜下仔细挑选裂隙少、晶型较完好、不同形态、大小和颜色不同的锆石 13 粒,并对这 13 粒锆石进行了详细的 BSE 图像研究。由 BSE 图像可测得,锆石颗粒长宽比为 $1:1.3\sim 1:3.2$,平均 $1:1.8$ 左右,长轴长 $139\sim 390\text{ }\mu\text{m}$ 。部分锆石晶型较完好,无色或浅紫红色,呈柱状,四方双锥晶面发育,主要为(100)、(110)、(111)的聚形,代表性锆石 BSE 图像见图 2, CL 图像见图 3,图上标示了测点的位置、编号和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值。

本次试验共对 13 粒锆石进行了 U-Pb 年龄测定。其中,在 BSE 图像上深色区域(暗灰色区域)的锆石晶型较完好(如图 2 中 5-1 和 11-1 号测点所在的样品),为年龄较大的一组,共有 11 个测点,元素 Th、U 的绝对含量和 Th/U 比值较低,其中 Th 含量为 $15\times 10^{-6}\sim 418\times 10^{-6}$,平均 108×10^{-6} ;元素 U 含量为 $32\times 10^{-6}\sim 613\times 10^{-6}$,平均 249×10^{-6} ; $\text{Th}/\text{U}=0.10\sim 0.69$,平均 $\text{Th}/\text{U}=0.36$,这些测点所在锆石微区在 CL 图像上具有明显的岩浆振荡环带构造(图 3),属岩浆成因锆石(关康等, 1997; Liati et al, 2002; Tomaschek et al, 2003; Hu et al, 2004; 刘锋等, 2008; 聂凤军等, 2009),这 11 个测点在锆石 U-Pb 谐和图上除 11-1 号点 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}=0.85783\pm 0.01602$ 过高而远离谐和曲线,产生 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 不一致年龄外,其它 10 个点均分布在一致曲线上或附近,其中 9-1 号点的年龄明显偏老, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $424\pm 5\text{ Ma}$,可能为捕获锆石,另外 3-1、4-1 号点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $353\pm 5\text{ Ma}$ 和 $348\pm 4\text{ Ma}$,年龄明显偏新,

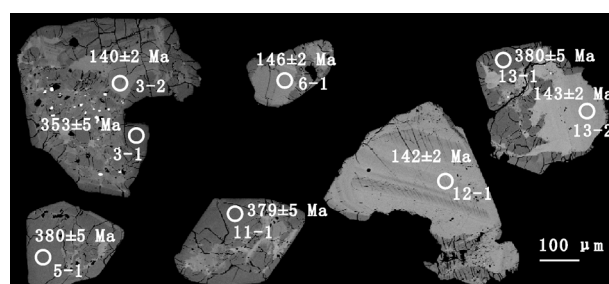


图 2 东坪金矿区含金钾质蚀变岩中的锆石 BSE 图像
Fig. 2 BSE images of zircons from auriferous intense k-feldspar-altered rock in the Dongping gold deposit

可能代表岩浆锆石与热液锆石的混合年龄，其余 7 个点表面年龄值集中在 374 ~ 389 Ma 之间，其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $382.8 \pm 3.3 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.4$ ，见图 4(a))，这个年龄记录了晚泥盆世水泉沟碱性杂岩体侵位的年龄。

另外，在 BSE 图像上浅色区域(灰白 - 亮灰白色

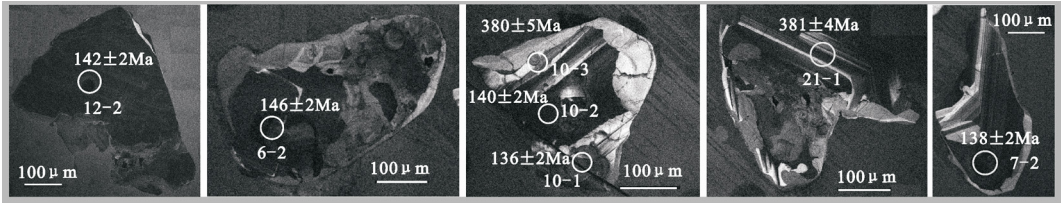


图 3 东坪金矿区含金钾质蚀变岩中的锆石 CL 图像

Fig. 2 CL images of zircons from auriferous intense k-feldspar-altered rock in the Dongping gold deposit

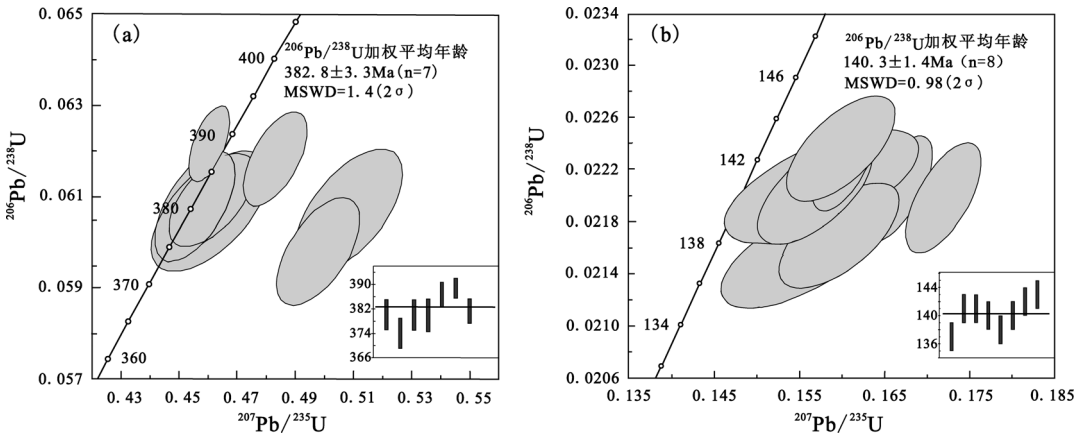


图 4 东坪金矿含金钾质蚀变岩中的锆石 U-Pb 年龄谐和图解

Fig. 4 Concordia diagram of zircons from auriferous intense k-feldspar-altered rock in the Dongping gold deposits

表 1 东坪金矿含金钾质蚀变岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

点号	Th($\times 10^{-6}$)	U($\times 10^{-6}$)	Th/U	同位素原子比值			表面年龄 (Ma)		
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
3-1	26	172	0.15	0.06476 ± 0.00238	0.503 ± 0.01694	0.05634 ± 0.00082	766 ± 79	414 ± 11	353 ± 5
3-0	20	78	0.19	0.05676 ± 0.00078	0.48305 ± 0.00723	0.06183 ± 0.00068	483 ± 36	400 ± 5	387 ± 4
4-1	133	525	0.25	0.06243 ± 0.00204	0.47715 ± 0.01428	0.05543 ± 0.00074	689 ± 72	396 ± 10	348 ± 4
5-1	96	277	0.35	0.05435 ± 0.00107	0.45541 ± 0.00913	0.06079 ± 0.0008	386 ± 23	381 ± 6	380 ± 5
8-1	100	238	0.42	0.06037 ± 0.00112	0.49775 ± 0.00942	0.0598 ± 0.00078	617 ± 20	410 ± 6	374 ± 5
13-1	131	244	0.53	0.06459 ± 0.0016	0.5404 ± 0.01324	0.06068 ± 0.00087	761 ± 28	439 ± 9	380 ± 5
11-1	186	270	0.69	0.10267 ± 0.00189	0.85783 ± 0.01602	0.0606 ± 0.00082	1673 ± 17	629 ± 9	379 ± 5
9-1	418	613	0.68	0.05688 ± 0.00093	0.53346 ± 0.00916	0.06803 ± 0.00086	487 ± 18	434 ± 6	424 ± 5
10-3	16	32	0.10	0.06059 ± 0.00010	0.50838 ± 0.01224	0.06070 ± 0.00089	633 ± 36	417 ± 8	380 ± 5
19-1	15	87	0.35	0.05370 ± 0.00037	0.46031 ± 0.00466	0.06216 ± 0.00055	367 ± 15	385 ± 3	389 ± 3
20-1	47	202	0.28	0.06912 ± 0.000936	0.58115 ± 0.00976	0.06093 ± 0.00067	902 ± 28	465 ± 6	381 ± 4
1-1	664	4377	0.15	0.05227 ± 0.00219	0.15513 ± 0.00619	0.02153 ± 0.00027	297 ± 98	146 ± 5	137 ± 2
2-1	764	5060	0.15	0.05484 ± 0.00085	0.16659 ± 0.0027	0.02204 ± 0.00027	406 ± 17	156 ± 2	141 ± 2
2-2	552	3348	0.16	0.0518 ± 0.00259	0.15759 ± 0.0076	0.02206 ± 0.00029	277 ± 117	149 ± 7	141 ± 2
3-2	6963	6269	1.11	0.05679 ± 0.00092	0.17201 ± 0.00291	0.02197 ± 0.00028	483 ± 18	161 ± 3	140 ± 2
7-2	1255	5304	0.24	0.05341 ± 0.0017	0.15968 ± 0.00471	0.02168 ± 0.00027	346 ± 74	150 ± 4	138 ± 2
9-2	769	3936	0.20	0.05164 ± 0.00161	0.15682 ± 0.00447	0.02202 ± 0.00027	269 ± 73	148 ± 4	140 ± 2
12-1	606	15200	0.04	0.05224 ± 0.00107	0.16045 ± 0.00264	0.02228 ± 0.00027	296 ± 48	151 ± 2	142 ± 2
13-2	2743	11127	0.25	0.05188 ± 0.00152	0.15992 ± 0.00425	0.02235 ± 0.00027	280 ± 69	151 ± 4	143 ± 2
10-1	861	4196	0.21	0.11426 ± 0.00509	0.33668 ± 0.01421	0.02137 ± 0.0003	1868 ± 82	295 ± 11	136 ± 2
10-2	16498	14002	1.18	0.09704 ± 0.00422	0.29286 ± 0.01214	0.02189 ± 0.00029	1568 ± 84	261 ± 10	140 ± 2
6-2	4444	5388	0.82	0.06376 ± 0.00082	0.20074 ± 0.00283	0.02283 ± 0.00028	734 ± 13	186 ± 2	146 ± 2

区域), 锆石多呈不规则状, 具明显的交代结构(如图 2 中 6-2 和 13-2 号测点所在的样品区域), 部分样品甚至被热液改造成完整的热液锆石颗粒(如图 2 中 12-1 号测点所在的样品), 为年龄较新的一组, 共有 11 个测点, 这些测点的锆石属热液锆石(详见讨论部分)。11 个测点, 除点 10-1、10-2、6-2 的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 值过大(远大于 0.175)而远离谐和线外, 其余 8 个点分布在 U-Pb 年龄谐和曲线上或附近, 这 8 个点的表面年龄值集中在 136 ~ 146 Ma 之间, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 140.3 ± 1.4 Ma(MSWD=0.98, 图 4(b)), 这个年龄记录了岩浆锆石被后期热液交代改造的年龄, 即东坪金矿含金钾质蚀变的年龄为 140.3 ± 1.4 Ma。

4 成岩成矿时代讨论

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, 由于热液蚀变作用, 使得热液流体沿锆石晶体边缘、裂隙或晶格缺陷处对锆石进行的交代、改造作用, 可以形成复杂的锆石形态和内部结构, 并使部分锆石区域 U-Pb 体系封闭性遭到破坏, 甚至形成新的热液锆石(锆石 U-Pb 体系重置), 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)。但是锆石中仍有局部区域, 由于锆石本身的稳定性, 在受到交代蚀变改造的锆石中, 仍会有保留 U-Pb 体系的封闭性未被重置的区域, 对这些锆石微区进行 U-Pb 定年仍旧可以得到反映这些原生锆石形成的地质年龄(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的 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 年龄谐和曲线上或附近, 7 个测点的加权平均年龄为 382.8 ± 3.3 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, 这个年龄表明水泉沟碱性杂岩体形成于晚泥盆世。

有关不同作者使用不同方法测定水泉沟碱性杂岩体的形成年龄, 罗镇宽等(2001)已有详细讨论, 他们认为: 前人对水泉沟岩体进行了广泛的年代学研究, 包括 K-Ar、Rb-Sr、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 、常规锆石 U-Pb、单颗粒锆石和颗粒锆石 U-Pb 法等, 所得年龄很不一致(年龄结果详见本文表 2), 由于这些测试方法存在各种各样的弊端, 因而出现了较大的年龄偏差, 不能给出真实的成岩年龄, 本文在此就不复述了。

我们这次实验获得水泉沟碱性杂岩体主体侵位时代为 382.8 ± 3.3 Ma, 属于晚泥盆世, 这一年龄虽然与罗镇宽等(2001)获得东坪金矿区内碱性杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 390 ± 6 Ma 有近 7 Ma 左右的差值, 与后沟金矿区正长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 386 ± 6 Ma 有 4 Ma 左右的偏差, 但同为晚泥盆世, 可以认为它们在误差范围内年龄一致。因此, 本文获得的 382.8 ± 3.3 Ma 的年龄, 可以代表东坪金矿区水泉沟碱性杂岩体的侵位年龄, 即水泉沟碱性杂岩体形成于晚泥盆世。

4.2 金矿成矿时代

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金矿的成矿时代。但是,

表 2 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 2 Isotopic ages of the Dongping gold deposit and Shuiquangou 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	矿区多处	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	992(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±65(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 70 号脉	153 ± 3Ma 152 ± 3Ma	Hart et al., 2002

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有时可能会得出错误的结论。因此, 要准确限定金矿床的成矿时代, 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金矿床中发现热液锆石和热液锆石微区 U-Pb 定年结果的报道(Kerrich, 1993; Hu et al., 2004; Fu et al, 2009; Li, 2009), 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脉体的形成条件极为相似。因此, 通过寻找含金蚀变岩中的热液锆石, 利用锆石微区 U-Pb 定年, 可以确定金矿床的形成时代, 可以为金矿床的定年提供新途径。

东坪金矿 70 号脉具有钾长石-绿泥石-绿帘石-绢云母-钠长石矿化等蚀变组合, 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色(具无阴极发光特征)(见图 3), 这些锆石微区的 Th 和 U 含量较岩浆锆石微区的含量明显偏高, 并且变化范围很大, 其中 Th 含量为 $552 \times 10^{-6} \sim 16498 \times 10^{-6}$, 平均 3283.5×10^{-6} ; U 含量为 $3348 \times 10^{-6} \sim 15200 \times 10^{-6}$, 平均 7109.7×10^{-6} , 其 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 比值范围为 $0.04 \sim 1.18$, 平均 0.41, 远大于 0.1。特别是同在一颗锆石中的 3-2 是 3-0 号测点 Th 含量的 348 倍, U 含量的 80.4 倍; 同为一颗锆石的 13-2 是 13-1 号测点 Th 含量的 21 倍, U 含量的 46 倍; 同为一颗锆石的 10-2 是 10-3 号测点 Th 含量的 1031 倍, U 含量的 438 倍。这些结果表明原生岩浆锆石通过热液交代或改造作用后, 使得 Th、U 等元素在不规则状锆石区域或锆石边缘极度富集, 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, 形成新的锆石区域。这些特征与澳大利亚 Boggy Plain 岩体中的热液锆石和我国新疆天格尔糜棱岩化花岗岩以及新疆咸水泉片麻状花岗岩热液锆石增生边具有非常相似的特征, 表明这些被改造的区域属于热液锆石(Hoskin, 2005; 朱永峰等, 2006; 唐俊华等, 2007)。具有热液蚀变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, 这个年龄可以记录热液活动的年龄。我们这次实验得到的分布在 U-Pb 年龄谐和曲线上

或附近的热液锆石的 8 个测点, 其加权平均年龄为 $140.3 \pm 1.4 \text{ Ma}$, 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热液交代或改造事件, 这个年龄即为含金钾质蚀变岩的侵位年龄或东坪金矿的成矿年龄为 $140.3 \pm 1.4 \text{ Ma}$, 表明东坪金矿 70 号脉形成于早白垩世。

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, 但由于较少使用高精度定年方法, 所测年龄数据参差不齐。王正坤等(1992)用 K-Ar 法测得钾长石年龄为 157.37 Ma , 卢德林等(1993)利用 K-Ar 法和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法测定矿石中的钾长石, 分别获得 $148.1 \pm 2.2 \text{ Ma}$ 和 $156.7 \pm 0.88 \text{ Ma}$ 的年龄值。王蓉蝶(1992)对与东坪金矿相邻的后沟金矿床钾质蚀变岩中的钾长石用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法测年, 获得 $148.3 \pm 4 \text{ Ma}$ 和 $187.5 \pm 5.3 \text{ Ma}$ 的数据。由于该区处于崇礼-赤城断裂南侧, 先后受到过海西、印支和燕山期的构造-岩浆热事件的影响, Ar 有可能丢失, K-Ar 法、 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法不能给出真实的地质事件年龄。本文成功获得成矿年龄为 $140.3 \pm 1.4 \text{ Ma}$, 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)和中国北方中生代存在 3 大成矿期次 $200 \sim 160 \text{ Ma}$ 、 140 Ma 和 120 Ma 的观点(毛景文等, 2005)一致。另外, Hart 等(2002)利用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法测定东坪金矿 70 号脉中的两个绢云母样品得到 $153 \pm 3 \text{ Ma}$ 和 $152 \pm 3 \text{ Ma}$ 的年龄数据, 这两个较为一致的年龄代表东坪金矿 70 号脉热液活动形成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 左右的年龄与作者测到的 $140.3 \pm 1.4 \text{ Ma}$ 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, 即东坪金矿是在晚侏罗世-早白垩世期间多阶段成矿作用形成的, 但主成矿期为早白垩世。

4.3 成岩与成矿的关系

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 $382.8 \pm 3.3 \text{ Ma}$, 代表金矿成矿年龄的热液锆石年龄为 $140.3 \pm 1.4 \text{ Ma}$, 成岩与成矿年龄相差 242 Ma 左右, 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锆石 U-Pb 年龄为 1.7 Ga (与姜能个人通信获知)、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 $235 \pm 2 \text{ Ma}$ (Jiang et al, 2007), 这些花岗岩的年龄均远早于东坪金矿 140.3 Ma 或 $152 \sim 153 \text{ Ma}$ 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,与东坪金矿成矿的热液流体到底来源于何处呢?本文借助BSE图像显示的热液交代锆石在岩浆锆石中十分发育(见图2),东坪金矿田的规模又特别大(达大型,并具有超大型规模的潜力),表明热液流体来源的规模应该十分巨大。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测年的年龄范围为 $143.0 \pm 3.7 \sim 136.1 \pm 1.4$ Ma,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均有大面积分布,作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。另外,位于东坪金矿区东南约3 km的上水泉正长花岗岩岩体(注:原用“钾长花岗岩”一词不规范,应为正长花岗岩),出露面积约 8 km^2 , LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 142.9 ± 0.8 Ma(Jiang et al., 2009)。再者,位于水泉沟碱性杂岩体东部的转枝莲暗灰色闪长岩(出露面积约 1 km^2)锆石SHRIMP U-Pb年龄为 139.5 ± 0.9 Ma(Jiang et al., 2007)。这些高精度同位素年龄结果均为早白垩世,与本文获得东坪金矿 140.3 ± 1.4 Ma的成矿年龄在误差范围内几乎一致,证明东坪金矿的成矿与晚侏罗世-早白垩世期间的火山活动或/和矿体周围的燕山期小型侵入体、脉岩或隐伏岩体侵位后期的热液活动有关,成矿时代应为燕山中晚期。

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:北北东向、北东向断裂系统)、适宜的物化条件(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。

4.4 地质意义

许多研究者认为东坪、后沟等金矿床产于水泉沟碱性杂岩体的内外接触带,属于与碱性杂岩体有关的碱性岩型金矿床。我们这次研究获得东坪金矿70号脉深部的钾质蚀变岩中的锆石U-Pb加权平均年龄为 140.3 ± 1.4 Ma,可以确定金矿床形成于早白垩世,而水泉沟碱性杂岩体形成于 382.8 ± 3.3 Ma,两者时差接近242 Ma,说明东坪金矿可能与水泉沟碱性杂岩体的关系不大。另外,水泉沟岩体已被剥蚀成岩基,面积达 350 km^2 ,如此大的岩基,在岩浆期后热液阶段成矿是相当困难的。因此,东坪金矿不属于与碱性杂岩体有关的金矿。再者东坪金矿的

矿体极少被脉岩、断层切割,即使有切割,断距也很小,说明东坪金矿存在多期成矿的可能性小,但不排除存在多阶段成矿的可能性。考虑到区域内有大面积的侏罗纪火山岩,矿区附近有上水泉花岗岩株、花岗细晶岩脉的岩浆活动,而这些地质体的形成时代与140 Ma的成矿年龄在误差范围内几乎一致,表明东坪金矿的成矿与燕山期花岗细晶岩脉、花岗岩株、侏罗纪火山岩的岩浆活动有关。这说明,在张宣地区开展金矿找矿,仅仅围绕水泉沟碱性杂岩体找矿是远远不够的,还要对水泉沟岩体附近的燕山期花岗岩株、正长岩株、花岗细晶岩脉,甚至侏罗纪火山岩等给予足够的重视。

5 结论

通过对河北省张宣地区东坪大型金矿床含金硅钾质蚀变岩中的锆石进行LA-ICP-MS U-Pb年龄分析和综合研究,我们得出以下几点认识:

(1)在BSE图像上呈暗灰色的锆石微区属岩浆锆石,其U-Pb加权平均年龄为 382.8 ± 3.3 Ma,这个年龄可代表中细粒正长岩的侵位年龄,即水泉沟岩体主体侵位于晚泥盆世。

(2)多呈不规则状充填在岩浆锆石中,在BSE图像上呈亮灰白色,在CL图像上为暗黑色(无阴极发光)的锆石微区属于热液锆石,其U-Pb加权平均年龄为 140.3 ± 1.4 Ma,这个年龄代表热液锆石的形成年龄,说明东坪金矿形成于早白垩世。

(3)本文获得东坪金矿的围岩中细粒正长岩年龄为 382.8 ± 3.3 Ma,代表金矿成矿年龄的热液锆石形成于 140.3 ± 1.4 Ma。这样,成岩与成矿年龄相差近242 Ma,说明东坪金矿的形成与围岩中细粒正长岩的侵位事件无直接关系。

致谢:在野外地质调查过程中得到东坪金矿矿山领导和地测科同行们提供的诸多帮助,南京大学地球科学与工程学院陈立辉老师用他的973项目(2006CB403508)为本文提供了锆石测年经费,南京大学地球科学与工程学院胡森林硕士进行了热液锆石样品的年龄测定工作,本文在成文过程中得到毛景文教授提供的诸多资料,评审专家悉心审阅本文,并提出了十分有益的修改意见,在此一并致谢!

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.

- 关康, 罗镇宽, 苗来成, 黄佳展. 1998. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究[J]. 地球学报, 33(3): 318-328.
- 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.
- 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]. 前寒武纪研究进展, 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.
- 刘锋, 李延河, 毛景文, 杨富全, 柴凤梅, 耿新霞, 杨宗喜. 2008. 阿尔泰山带阿巴宫花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 地球学报, 29(6): 795-804.
- 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. 金矿密集区的基底特征与成矿作用研究[M]. 北京: 地质出版社: 6-44.
- 罗镇宽, 苗来成, 关康, 裴有守, QIU Y M, MCNAUGHTON 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, 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.
- 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): 75-78.
- 聂凤军, 许东青, 江思宏, 胡朋. 2009. 苏-查萤石矿区钾长花岗岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 地球学报, 30(6): 803-811.
- 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.
- 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.
- 王蓉蝶. 1992. 河北金家庄地区长英质碱性岩的特征及成因[J]. 桂林冶金地质学院学报, 12(1): 12-20.
- 王郁, 蒋心明, 商木元. 1994. 冀西北与偏碱性岩有关的金矿地质特征及其成因[J]. 地质论评, 40(1): 369-376.
- 王正坤, 蒋心明, 王郁, 商木元. 1992. 张北张-宣地区水泉沟偏碱性杂岩体的起源和形成机制及地质意义[J]. 贵金属地质, (1): 18-25.
- 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质地球化学特征[J]. 地质科学, 29(3): 256-266.
- 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.

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 Zhi-wei, ZHAO Zhen-hua, ZHANG Pei-hua, WANG Yi-xian. 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).
- CHERNIAK D J, WATSON E B. 2003. Diffusion in zircon[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 113-143.
- DEMPTSTER T J, HAY D C, BLUCK B J. 2004. Zircon grows in slate[J]. Geology, 32: 221-224.
- DENG Jin-fu, MO Xuan-xue, ZHAO Hai-ling, LUO Zhao-hua, ZHAO Guo-chun, DAI Sheng-qian. 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, KOZLOWSKI 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.
- FU Bin, TERRENCE P M, NORIKO T K, ANTHONY I S K, JOHN W V. 2009. Distinguishing magmatic zircon from hydrothermal zircon: A case study from the Gidginbung high-sulphidation Au-Ag-(Cu)deposit, SE Australia[J]. Chemical Geology, 259:131-142.
- GUAN Kang, LUO Zhen-kuan, MIAO Lai-cheng, HUANG Jia-zhan. 1997. SHRIMP in zircon chronology for Guojialing suite granite in Jiaodong Zhaoye district[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(3): 318-328(in Chinese with English abstract).
- HART C J R, GOLDFARB R J, QIU Y, SNEE L W, MILLER L D, 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. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia.Geochem[J]. Cosmochim Acta, 69(3): 637-648.
- HU Fang-fang, FAN Hong-rui, YANG Jin-hui, WAN Yu-sheng, LIU Dui-yi, ZHAI Ming-guo, JIN Cheng-wei. 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 Xiao-die, CHEN Zhi-hong, ZHAO Yan-ming, WANG Kui-yuan. 1997. The metallongenetic 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).
- JIANG Neng, LIU Yong-sheng, ZHOU Wen-ge, YANG Jin-hui, ZHANG Shuang-quan. 2007. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China craton[J]. Geochim Cosmochim Acta, 71: 2591-2608.
- JIANG Neng, ZHANG Shuang-quan, ZHOU Wen-ge, LIU Yong-sheng. 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 Neng. 2005. Petrology and geochemistry of the Shuiquangu syenitic complex, northern margin of the North China Craton[J]. *Journal of the Geological Society*, 162:203-215.
- JIANG Si-hong, NIE Fen-jun. 2003. Nd-isotope constraints on origin of the Shuiquangu intrusive complex, North-Western Hebei, China[J]. *Geological Review*, 49(4): 355-360(in Chinese with English abstract).
- KERRICH 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]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 30: 2334-2351.
- LI Chang-min. 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).
- LIANG Hua-ying, MO Ce-hui, WANG Xiu-zhang. 1998. Single zircon Pb-evaporation $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of the gold-bearing Shuiquangu alkaline rock in Zhangjiakou area, Hebei province, China[J]. *Geochimica*, 27(1):59-65(in Chinese with English abstract).
- LIATI A, GEBAUER D, 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]. *Chemical Geology*, 184: 281-299.
- LIU Feng, LI Yan-he, MAO Jing-wen, YANG Fu-quan, CHAI Feng-mei, GENG Xin-xia, YANG Zong-xi. 2008. SHRIMP U-Pb ages of the Abagong granites in the Altay Orogen and their geological Implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(6): 795-804(in Chinese with English abstract).
- LU De-lin, LUO Xiu-quan, WANG Jian-jun, ZHANG Si-hong, ZHENG Bao-ying. 1993. The metallogenic epoch of the Dongping gold deposit[J]. *Mineral Deposits*, 12(2): 182-188(in Chinese with English abstract).
- LU Song-nian, LI Huai-kun, LI Hui-min, YANG Chun-liang, HU Zheng-de, JIANG Ming-Mei. 1997. Study on the precambrian basement and mineralization in the gold-concentrated region[M]. Beijing: Geological Publishing House: 41-44(in Chinese).
- LUDWIG K R. 2001. User's manual for Isoplot/Ex rev. 2.49: a geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication.
- LUO Zhen-kuan, MIAO Lai-cheng, GUAN Kang, QIU You-shou, QIU Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2001. SHRIMP chronological study of Shuiquangu intrusive body in Zhangjiakou area, Hebei province and its geochemical significance[J]. *Geochimica*, 30(2): 116-122(in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen, LI Yin-qing. 2003. Fluid Inclusion and Noble Gas Studies of the Dongping Gold Deposit, Hebei Province, China: A mantle connection for mineralization?[J]. *Economic Geology*, 98: 517-534.
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, ZHANG Zuo-heng, LI Xiao-feng, WANG Yi-tian, ZHANG Chang-qing, LI Yong-feng. 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).
- MO Ce-hui, LIANG Hua-ying, WANG Xiu-zhang, CHENG Jing-ping, LI Hui-min. 1997. zircon U-Pb dating of the Shuiquangu intrusive complex, North-Western Hebei, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(1): 75-77(in Chinese).
- NIE Feng-jun, XU Dong-qing, JIANG Si-hong, HU Peng. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of K-feldspar granite samples from the Aobaotu granite stock in the Su-Cha(Sumoqagan Obo)fluorite ore district, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 803-811(in Chinese with English abstract).
- SHAO Ji-an, WEI Chun-jing, ZHANG Lü-qiao, NIU Shu-yin, MU Bao-lei. 2004. The Zhuanzhilian pyroxene diorite in core of Zhuang-Xuan upwarp[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1389-1396(in Chinese with English abstract).
- SONG Guo-rui, ZHAO Zhen-hua. 1996. Geology of Dongping alkaline complex-hosted gold deposit in Hebei province[M]. Beijing: Earthquake Publishing House: 1-181(in Chinese).
- TANG Jun-hua, GU Lian-xing, ZHANG Zun-zhong, WU Chang-zhi, SAN Jin-zhu, WANG Chuan-sheng, LIU Si-hai, ZHANG Guang-hui. 2007. Characteristics, age and origin of the Xianshuiquan gneissose granite in eastern Tianshan[J]. *Acta Petrologica sinica*, 23(8): 1803-1520(in Chinese with English abstract).
- TOMASCHEK F, KENNEDY A K, VILLA I M. 2003. Zircons from Syros, Cyclades, Greece-recrystallization and mobilization of zircon during high-pressure metamorphism[J]. *Jour of Petrology*, 44(11): 1977-2002.
- WANG Rong-rong. 1992. The characteristics and genesis of the felsic alkali complex, Jinjiazhuang, Hebei[J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 12(1): 12-20(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu, JIANG Xin-ming, SHANG Mu-yuan, WANG Zheng-kun. 1994. Geological characteristics and genesis of the gold deposits related to the sub-alkaline complex in northwest Hebei Province[J]. *Geological Review*, 40(1): 369-376(in Chinese with English abstract).
- WANG Zheng-kun, JIANG Xin-ming, WANG Yu. 1992. Origin and forming mechanism of Shuiquangu subalkali complex in Zhangjiakou, Xuanhua area, Hebei[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, (1): 18-25(in Chinese with English abstract).
- WEI Ju-ying, SU Qi. 1994. Geochemistry characteristics of Shuiquangu rock body in Dongping gold ore district, Hebei province[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 29(3): 256-266(in Chinese with English abstract).
- WEI Zhong-liang, ZHANG Hong, LIU Xiao-ming, ZHANG Ye-qing. 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).
- ZHANG Zhao-chong, CHEN Hong-xin. 1997. Geology and petrology of Shuiquangu complex, northern Hebei province[J]. *Journal of precious metallic geology*, 6(2): 81-92(in Chinese with English abstract).
- ZHU Yong-feng, SONG Biao. 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).