

河北寿王坟铜矿黄铜矿铷锶同位素年龄测定及其成矿意义*

张瑞斌^{1,2} 刘建明^{1**} 叶杰¹ 陈福坤¹

ZHANG RuiBin LIU JianMing YE Jie and CHEN FuKun

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Chinese Academy of Sciences; Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2007-07-30 收稿, 2008-02-28 改回.

Zhang RB, Liu JM, Ye J and Chen FK. 2008. Chalcopyrite Rb-Sr isochron age dating and its' ore-forming significance in Shouwangfen copper deposit, Hebei province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1353–1358

Abstract In this paper, the sub-sample chalcopyrite Rb-Sr isochron age, 111.0Ma, had been successfully measured, which illustrated the skarn ore-forming age in Shouwangfen copper deposit. Contrasting with chalcopyrite + pyrite assemblage age (113.6Ma) and chalcopyrite + skarn age (112.3Ma) and chalcopyrite + pyrite + skarn age (115.0Ma) obtained by the same means, convinced us that directly dating the sub-sample metal minerals' age could be a routine metal deposit chronological method.

Key words Chalcopyrite Rb-Sr isotope Dating; Sub-sample; Ore-forming age; Shouwangfen copper deposit

摘要 本文以黄铜矿及其共生矿物为定年对象, 采用亚样品取样和铷锶等时线定年方法测定了寿王坟铜矿的成矿时代。分析测试获得黄铜矿 + 黄铁矿单矿物组合的等时线年龄 113.6Ma, 黄铜矿 + 夕卡岩组合的等时线年龄 112.3Ma 和黄铜矿 + 黄铁矿 + 夕卡岩组合的等时线年龄 115.0Ma。对比同一矿石亚样品, 认为河北寿王坟夕卡岩型铜矿成矿时代为 111.0Ma。实验表明, 采用矿石亚样品取样方法和直接测定金属硫化物单矿物铷-锶同位素年龄可以有效地确定矿床成矿时代。

关键词 寿王坟铜矿; 黄铜矿; 铷锶定年; 亚样品; 成矿时代

中图法分类号 P597.3; P618.41

精确测定金属矿床的成矿时代, 对于正确认识矿床成因和控矿地质因素、掌握成矿规律并指导找矿勘查实践都具有极为重要的意义(刘建明等, 1998a), 而直接测定金属矿物的同位素年龄是确定矿床成矿时代的最佳方法。同位素地质年代法近几十年来有了飞速的发展, 使直接测定矿石矿物及其包裹体的年龄成为现实。间接测定成矿时代的同位素地质年代方法有采用 U-Th-Pb、K-Ar、Ar-Ar、Rb-Sr、Sm-Nd 测定岩浆岩或沉积岩围岩年龄; 采用 Ar-Ar、K-Ar 和 Rb-Sr 法测定蚀变矿物和石英年龄(骆万成和伍勤生, 1987; 胡达囊和罗桂玲, 1994); 采用 U-Pb 和 Pb-Pb 法测定含铀副矿物, 如水

热成因锆石(Kerrich and Kyser, 1994)、独居石(Wang *et al.*, 1994)、金红石(Clarke *et al.*, 1990)和磷钇矿等(McNaughton *et al.*, 1999); 采用 Sm-Nd 法测定脉石矿物, 如萤石(Chesley *et al.*, 1991)、电气石(Anglin *et al.*, 1996)和方解石(Peng *et al.*, 2003)和 Rb-Sr 法测定石英流体包裹体(Shepherd and Derbyshire, 1981; 李华芹等, 1992)等。

直接测定金属矿物及其包裹体同位素年龄非常困难, 原因主要在于金属矿物的沉淀受生成化学反应环境复杂性影响, 经常没有达到同位素平衡(甚至没有达到化学平衡)和同位素均一化, 而且常受到后期构造-热活动影响造成同位素

* 国家自然科学基金(49873022)和中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-07)的研究成果。

第一作者简介: 张瑞斌, 男, 1973 年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业

** 通信作者: 刘建明, E-mail: jmlu@mail.igcas.ac.cn

体系的变化。较为稳定的耐热-构造活动的放射性同位素种类很少,仅 Rb-Sr、Sm-Nd 和 Re-Os 等少数几种,它们在金属矿物中含量低(常小于 $10 \sim 6 \mu\text{g/g}$),又多存在形式不清,所以对化学分离流程和质谱仪同位素比值测定的要求非常高(刘建明等,1998b)。近二十多年来,成功的定年对象和方法主要有:黄铁矿 Ar-Ar 法(York *et al.*, 1982)、黄铁矿 Rb-Sr 法(杨进辉和周新华,2000)、黄铁矿 Re-Os 法(Zhang *et al.*, 2005)、闪锌矿 Rb-Sr 法(Nakai *et al.*, 1993)、闪锌矿流体包裹体 Rb-Sr 法(Nakai *et al.*, 1990; Pettke and Diamond, 1996)、白钨矿 Sm-Nd 法(Bell *et al.*, 1989)和辉钼矿 Re-Os 法(杜安道等,1994)等。各种方法都有其各自不同的适用性和局限性,对同一矿床采用不同的定年方法可得出十分悬殊的年龄结果。因此,不少研究者强调应在扎实的野外工作基础上综合采用多元同位素体系对成矿事件进行年代学研究,要尽可能将直接测定和间接测定方法有机结合(陆松年等,1999),强调在定年中要加强对成岩成矿地质背景的研究,重视不同地质体与成矿先后关系,确定标志性地质体,选择合适的定年方法(魏俊浩等,2003)。

可见,在主要的金属硫化物中,闪锌矿和黄铁矿的 Rb-Sr 等时线定年已经有了很好的实例报道。然而,对于硫化物矿床中最为常见、也是最为重要的金属矿物黄铜矿的直接定年实例尚未见报道。本文通过直接测定寿王坟夕卡岩型铁铜矿床中黄铜矿 Rb-Sr 同位素等时线年龄,建立了黄铜矿直接 Rb-Sr 法定年的化学前处理流程,同时结合前人的矿床地质特征的研究成果及成矿岩体年龄数据分析,论证了获得的年龄数据的可靠性。

1 矿床地质概况

寿王坟铜矿是一个典型的夕卡岩型矿床,具有镁夕卡岩型和钙夕卡岩型双重成矿特征。在构造上矿区位于华北地台燕山台褶带月明山凹陷(也有称燕山沉降带中段北缘的兴隆台凹)南部边缘,东西向尚义-平泉断裂与北东向兴隆-鹰手营子-烟筒山断裂交汇处。矿区地层主要有中元古界蓟县系雾迷山组中厚层白云岩、含燧石条带或结核灰质白云岩和中侏罗统后城组紫色凝灰质粉砂岩、粗砂岩及角砾岩。寿王坟复式倒转背斜奠定了矿区构造的总体轮廓,背斜轴近东西向,轴面北倾,倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$ 。寿王坟杂岩体在背斜轴中部侵入,造成倾角较陡的逆断层以环状、放射状环绕杂岩体分布(图1)。寿王坟侵入杂岩体为酸性钙碱系列多期复式岩体,呈岩株状产出。岩性由内向外依次为花岗闪长岩→石英二长闪长岩→闪长岩,岩石化学成份上相对富碱。此外,在杂岩体内部和周围还发育晚期正长斑岩脉岩。

寿王坟铜矿床主要发育在杂岩体西南部花岗闪长岩与雾迷山组白云岩狭长接触带夕卡岩中。夕卡岩可分为镁夕卡岩和钙夕卡岩。后期热液退化蚀变主要有绿泥石化、绢云

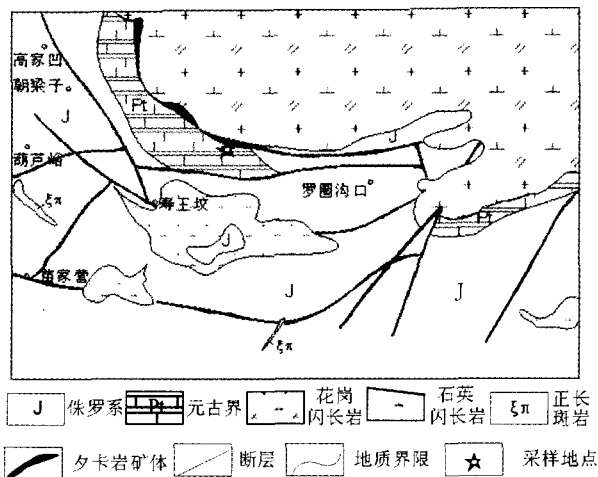


图1 寿王坟铜矿矿区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of Shouwangfen copper deposit

母化、蛇纹石化和碳酸盐化。在杂岩体外接触带及正长斑岩周围,也发现铜、铁、钼等矿床和矿点多处。夕卡岩型矿石的矿物组成非常复杂,不同地点相差很大。金属矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿、磁铁矿等及次生矿物。脉石矿物有透辉石、石榴石、透闪石、粒硅镁石、阳起石、蛇纹石、方解石和滑石等。

2 样品及分析结果

因寿王坟铜矿主矿已闭坑,样品采集于狭义的寿王坟铜矿床顶部龙潭沟个体采坑。在采矿坑道内见到一处不足10m长的夕卡岩型矿床由外接触带至岩体的分带剖面。蚀变围岩具有由灰色微晶—白色细晶大理岩化至白色隐晶硅化的灰质白云岩与沿裂隙扩散的绿色透闪石-阳起石化、滑石化的夕卡岩矿物条带并存的构造特征。夕卡岩矿物主要为交代透辉石的针状透闪石、放射状阳起石和蚀变镁橄榄石的粒硅镁石、金云母等。矿石矿物主要是黄铜矿和黄铁矿,还有少量磁铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿等。黄铜矿以浸染状、细脉状、团块状沉积在早期形成的各类夕卡岩矿物、磁铁矿之间。黄铜矿多交代黄铁矿和磁黄铁矿。本文分析的矿石样品采自其中黄铜矿含量较多且晶形较粗的岩块,大小约 $6\text{cm} \times 6\text{cm} \times 9\text{cm}$,金属矿物呈它形—半自形粒状、团块状散布于夕卡岩当中。

铷-锶同位素定年采用亚样品取样法,即将一个野外采集手标本样品剖切成几个不同部位的小样品后分别作为一个样品来分析。亚样品与在地质体不同空间位置所采的样品相比,更可能在成矿作用过程中达到同位素初始比值的均一(杨进辉和周新华,2000)。在系统的野外和室内岩矿相观察鉴定后,分别挑选矿石不同部位亚样品中金属硫化物单矿

物样品及夕卡岩样品,共采集了4个黄铜矿、1个黄铁矿和3个夕卡岩样品。实验在中国科学院室地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室完成,除质谱仪分析由专人操作外全部由本人完成。洗净晾干后的样品被切分成8块亚样品,分别粉碎成40~60目后在双目显微镜下挑选单矿物;然后在超净实验室将单矿物试样超纯水漂洗晾干后粉碎成200目以下粉末,夕卡岩样品清洗后直接粉碎成200目以下粉末。预先采用ICP-MS分析了Rb和Sr含量,以便合理使用单矿物样量和稀释剂用量。矿物样品经超声波洗涤超纯水

漂洗烘干后,称取约300mg,加入适量的⁸⁷Rb和⁸⁴Sr混合稀释剂,采用HCl+HNO₃混合酸溶解,之后离心样品溶液,吸取清液于离子交换柱分离Rb和Sr。特别提出,单矿物溶解流程中采用6N HCl和15N HNO₃比例为1:1的混合酸,是作者多次试验的结果,可使黄铁矿、黄铜矿溶解过程不激烈、不产生单质硫;且为保证离子交换柱的树脂的活性,采用“一样三柱”分离样品。全流程本底小于100 pg。铷和锶同位素测量采用Finnigan MAT262质谱仪,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194校正。测定结果见表1。

表1 寿王坟铜矿亚样品中黄铜矿、黄铁矿及夕卡岩 Rb-Sr 同位素比值和含量测定结果

Table 1 The sub-samples' Chalcopyrite, pyrite and skarn Rb-Sr isotope content and its' ratio in Shouwangfen copper deposit

样品号	样品名称	Rb (× 10 ⁻⁶)	Sr (× 10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr (2σ)
S3-1	黄铁矿	0.4267	0.2835	4.358	0.713576 ±0.000009
S3-3	黄铜矿	0.9836	0.6196	4.601	0.713624 ±0.000012
S3-4	黄铜矿	0.1033	0.8819	0.3393	0.706980 ±0.000076
S3-5	黄铜矿	0.0401	0.3696	0.3135	0.706739 ±0.000026
S3-7	黄铜矿	0.0986	1.992	0.1432	0.706623 ±0.000025
Q4	夕卡岩	2.875	24.28	0.3427	0.706697 ±0.000032
Q10	夕卡岩	1.271	27.62	0.1332	0.706646 ±0.000012
Q6	夕卡岩	1.155	24.23	0.1379	0.706249 ±0.000025

铷-锶等时线年龄计算采用 Isoplot/Ex Version3.23 计算程序(Ludwig,2001),λ值 $1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$,⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值误差给定1%,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值误差给定0.05%,误差相关系数0.8,置信度95%。计算处理结果:黄铜矿等时线年龄为 $111.0 \pm 5.3 \text{ Ma}$ (图2),⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值 0.70636 ± 0.00017 ;黄铜矿+黄铁矿等时线年龄为 $113.6 \pm 4.8 \text{ Ma}$ (图3),⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值 0.70636 ± 0.00021 ;黄铜矿+夕卡岩等时线年龄为 $112.3 \pm 5.3 \text{ Ma}$ (图4),⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值 0.70628 ± 0.00015 ;黄铜矿+黄铁矿+夕卡岩等时线年龄为 $115.0 \pm 4.2 \text{ Ma}$ (图5),⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值 0.70627 ± 0.00015 。

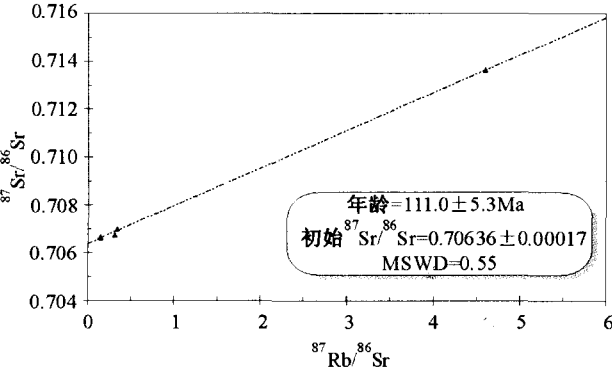


图2 寿王坟铜矿黄铜矿 Rb-Sr 等时线年龄图

Fig. 2 The chalcopyrite Rb-Sr isochron age plot for Shouwangfen copper deposit

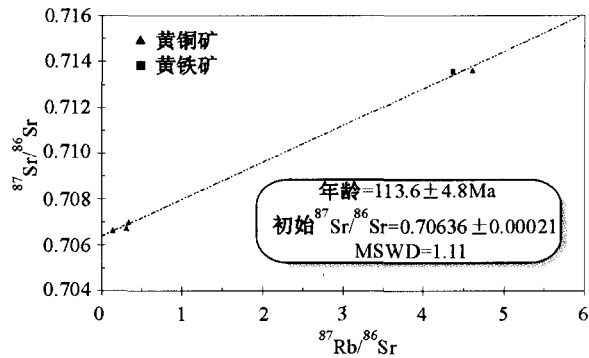


图3 寿王坟铜矿黄铜矿和黄铁矿的 Rb-Sr 等时线年龄图

Fig. 3 The chalcopyrite and pyrite Rb-Sr isochron age plot for Shouwangfen copper deposit

3 讨论

众所周知,直接测定金属矿物同位素年龄来确定金属矿床成矿时代的最主要的困难在于金属矿物的放射性同位素含量非常低,矿物中次生流体包裹体的存在常常破坏了同位素的封闭体系;而且热液成矿过程是个开放非平衡体系。Nakai et al. (1993) 就已发现矿床流体中同位素的不均一性

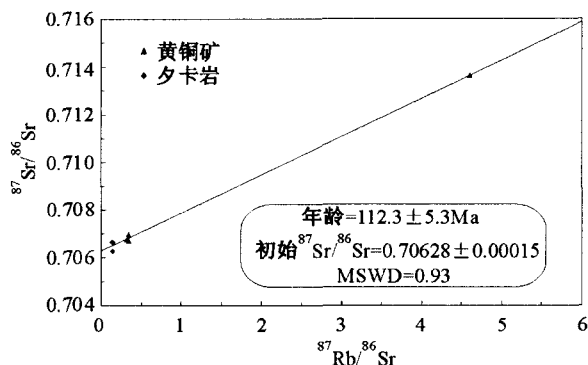


图4 寿王坟铜矿黄铜矿和夕卡岩的 Rb-Sr 等时线年龄图

Fig. 4 The chalcopyrite and skarn Rb-Sr isochron age plot for Shouwangfen copper deposit

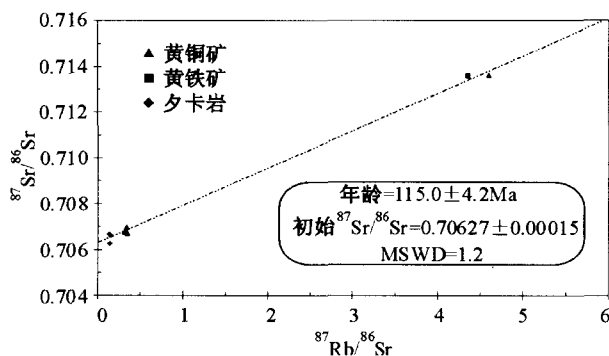


图5 寿王坟铜矿黄铜矿, 黄铁矿和夕卡岩的 Rb-Sr 等时线年龄图

Fig. 5 The chalcopyrite, pyrite and skarn Rb-Sr isochron age plot for Shouwangfen copper deposit

影响了闪锌矿定年的准确性。在实验过程中,将单矿物粉碎成 200 目以下后,进行超声波清洗,基本上可以排除原生以及次生流体包裹体的干扰(刘建明等,1998a)。采用亚样品测年,一块手标本上不同部位的亚样品与在地质体不同空间位置所采的样品相比,更可能在成矿作用过程中达到同位素初始比值的均一(杨进辉和周新华,2000)。因此,采用同一手标本是进行定年的最佳选择。但是,由于单一手标本中 Rb/Sr 比值变化小,因而常难于被采用。从本次实验测定结果可见,黄铜矿和黄铁矿的铷和锶含量均很低,仅有一个黄铜矿的 Sr 含量为 1.9×10^{-6} 外,其余样品都小于 1.0×10^{-6} ,但是, Rb/Sr 比值变化相对较大,这使得黄铜矿同位素等时线年龄成功获得。需要注意的是,个别测定结果的偏差较大,这可能由于稀释剂添加量的不合适造成的(罗修全,1979)。从本次实验结果来看,获得的年龄非常相近,变化在 111.0 ~ 115.0 Ma 之间,在误差范围内一致。等时线给出的初始锶同位素比值也非常接近,变化在 0.70627 ~ 0.70643 之间,可

能表明成矿物质来源于地壳深源岩浆,与该矿床碳-氧同位素研究结果相吻合(张瑞斌等,2003)。

有关寿王坟矿床的成矿年代学报道仅有辉钼矿 Re-Os 模式年龄 144.7 ± 10.7 Ma (黄典豪等,1996)。其它文献也报道了与成矿关系密切的寿王坟杂岩体中花岗闪长岩 K-Ar 年龄 127 Ma (权恒等,1992) 和 101 ~ 109 Ma (吴珍汉和孟宪刚,1998) 和黑云母 K-Ar 年龄 113.4 Ma (《全国同位素地质年龄数据汇编》编纂小组,1983),花岗闪长岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄 130 Ma (张德全和孙桂英,1988)。除了辉钼矿 Re-Os 模式年龄偏大外,成岩作用和成矿作用年龄基本上接近。近年来,研究表明华北东部中生代大规模流体成矿活动集中在早白垩世 (120 ± 10 Ma) (Zhai *et al.*, 2004),而且研究程度较高的胶东金矿集中区成矿流体大都显示地幔源或岩浆源(毛景文等,2002;周新华等,2002;范宏瑞等,2005)。寿王坟矿床在成矿时代和成矿流体来源上与华北东部大规模成矿作用可能存在密切的联系。

本文使用共生黄铜矿和黄铁矿组合的同位素年龄作为参考是根据刘建明(1998a)的建议,即用去除次生流体包裹体后的一组共生热液矿物进行热液金属矿床 Rb-Sr 等时线定年。李志昌等(1994)认为地壳中成矿流体大范围运移可以使成矿溶液中 Sr 和 Nd 同位素初始组成均一化,成矿条件的变化和矿物晶体化学性质的差异会引起 Rb-Sr 和 Sm-Nd 体系发生显著的分馏作用,因此,有色金属矿床中一组共生矿物有可能满足等时线条件,并成功地获得云南易门东川式铜矿床中共生黄铜矿 + 斑铜矿 + 黝铜矿 Rb-Sr 年龄 846 ± 26 Ma 和华南某地含金铜矿床中共生黄铁矿 + 黄铜矿 + 斑铜矿 Sm-Nd 年龄 190 ± 5 Ma。本文的黄铜矿 + 黄铁矿组合的 Rb-Sr 年龄 (113.6 Ma) 与黄铜矿 Rb-Sr 年龄 (111.0 Ma) 在误差范围内一致,表明利用黄铜矿单矿物测定年龄的精确性。而且,本文的矿相观察显示晚期黄铜矿多交代黄铁矿和磁黄铁矿,因此黄铁矿和黄铜矿组合有可能给出较老年龄结果,实验结果证实了这一观察。

Christensen and Halliday (1995) 在研究 Blendeval MVT 型矿床时代时,获得 55-5b 样品的灰岩 + 闪锌矿中流体包体 + 除去流体包体闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄为 362 ± 12 Ma,闪锌矿 + 闪锌矿流体包体 Rb-Sr 年龄为 357 ± 3 Ma,闪锌矿 Rb-Sr 年龄为 358 ± 8 Ma,各个年龄在误差范围内一致。本文测定的黄铜矿 + 夕卡岩 Rb-Sr 年龄 112.3 Ma 与黄铜矿 Rb-Sr 年龄 111.0 Ma 同样在误差范围内一致,表明夕卡岩矿体中夕卡岩与金属矿物的形成具有同时性;两者的初始锶同位素比值也相近,分别为 0.70628 和 0.70636,显示了该矿床形成中,夕卡岩和金属矿物的流体来源的同源性,进一步说明寿王坟铁铜矿床成矿物质来源为单一岩浆源的结论。

4 结论

采用亚样品取样和黄铜矿 Rb-Sr 定年分析方法确定了

河北寿王坟铜矿床的主成矿作用年龄为 111.0Ma 左右(早白垩世中期)。这一方法以黄铜矿为直接定年对象,从而为夕卡岩型、以及其它类型铜矿床的精确定年提供了直接而又可靠的技术途径。直接测定除去流体包裹体后的共生热液金属矿物组合的同位素组成也可以精确地确定热液矿床的成矿时代。本文获得黄铜矿+黄铁矿共生组合的等时线年龄 113.6Ma 可能代表寿王坟铜矿床早期的成矿年龄。通过黄铜矿、黄铁矿和夕卡岩亚样品 Rb-Sr 等时线计算得到的初始锶同位素比值相近(0.70627 ~ 0.70636),可能表明寿王坟铜矿成矿物质来源为单一岩浆源,同时说明寿王坟铜矿成矿作用可能与华北东部早白垩世(120 ± 10Ma)岩石圈减薄导致的大规模深源岩浆流体成矿活动有着紧密的成因联系。

致谢 本论文的完成是和很多人的帮助分不开的:野外工作中得到华北有色地质勘查 514 队杨仕道总工的带领和寿王坟铜矿上的支持,样品前处理试验中得到实验员朱和平、李潮峰和李金荣等人帮助,初稿完成后得到杨进辉博士等宝贵的修改意见,在此一并表示诚挚的谢意。

References

- Anglin CD, Jonasson IR and Franklin JM. 1996. Sm-Nd dating of scheelite and tourmaline: Implications for the genesis of Archean gold deposits, Val d'Or Canada. *Economic Geology*, 91: 1372 - 1382
- Bell K, Anglin CD and Franklin JM. 1989. Sm-Nd and Rb-Sr isotope systematics of scheelites: Possible implications of the age and genesis of vein-hosted gold deposit. *Geology*, 17: 500 - 504
- Chesley JT, Halliday AN and Scrivener RC. 1991. Samarium-neodymium direct dating of fluorite mineralization. *Science*, 252: 949 - 951
- Christensen JN and Halliday AN. 1995. Testing models of large-scale crustal fluid flow direct dating of sulfides: Rb-Sr evidence for early dewatering and formation of Mississippi valley-type deposit, Canning basin, Australia. *Economic Geology*, 90: 877 - 884
- Clarke ME, Krogh TE and Archibald DA. 1990. U-Pb zircon and rutile ages and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar biotite ages for the Victory Mine, Kambalda, western Australia: Constraints on the age and P-T-time conditions of mineralization. In: *Greenstone Gold and Crustal Evolution*. NUA Conference, Greenstone Gold Deposits, Val d'Or Quebec, 144 - 145
- Du AD, He HL, Yin NW, Zou XQ, Sun YL, Sun DZ, Chen SZ and Qu WJ. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites. *Acta Geologica Sinica*, 68 (4): 339 - 347 (in Chinese with English abstract)
- Fan HR, Hu FF, Yang JH, Shen K and Zhai MG. 2005. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong province. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (5): 1317 - 1328 (in Chinese with English abstract)
- Hu DJ and Luo GL. 1994. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar ages of gold-bearing quartz veins and their geological significances in Typical Gold Deposits of Zhangjiakou-Xuanhua Gold Field, Hebei Province. *Chinese Journal of Geology*, 29(2): 158 - 191 (in Chinese with English abstract)
- Huang DH, Du AD, Wu CY, Liu LS, Sun YL and Zou XQ. 1996. Metalochronology of molybdenum (copper) deposits in the North China Platform: Re-Os age of molybdenite and its geological significance. *Mineral Deposits*, 15(4): 365 - 373 (in Chinese with English abstract)
- Kerrick R and Kyser TK. 1994. 100Ma timing paradox of archaean gold, Abitibi Greenstone Belt (Canada): New evidence from U-Pb and Pb-Pb evaporation ages of hydrothermal zircons. *Geology*, 22: 1131 - 1134
- Li HQ, Liu JQ, Du GM and Wei L. 1992. The Chronology on ore-forming for endogenetic metallic deposits: Illustrated by Xihuashan tungsten deposit. *Chinese Science Bulletin*, 12: 1109 - 1112 (in Chinese)
- Li ZC, Cai H and Zhu JP. 1994. Direct dating on ore and sedimentary rocks. *Geology-geochemistry*, (1): 47 - 52 (in Chinese)
- Liu JM, Shen J, Zhao SR, Huo WG and Jiang N. 1998a. Isotopic dating for metallic deposits and its significance, Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 7(2): 107 - 113 (in Chinese with English abstract)
- Liu JM, Zhao SR, Shen J, Jiang N and Huo WG. 1998b. Review on direct isotopic dating of hydrothermal ore-forming processes. *Progress in Geophysics*, 13(3): 46 - 55 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Li HK and Li HM. 1999. Research on isotopic geochronology of mineralization events. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 335 - 342 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, USA, 1 - 53
- Luo WC and Wu QS. 1987. Dating the ore-forming ages of gold deposits by altering minerals in eastern of Jiaozhou Peninsula. *Chinese Science Bulletin*, 32(16): 1245 - 1248 (in Chinese)
- Luo XQ. 1979. Discussion on measuring error of radiogenic Strontium by isotopic dilution. In: *National isotopic geology conference Proceeding edit group, National Isotopic Geology Conference Proceeding*, Beijing: Geological Publishing House, 95 - 106 (in Chinese)
- Mao JW, Hao Y and Ding TP. 2002. Mantle fluids involved in metallogenesis of Jiaodong (East Shandong) Gold District: Evidence of C, O and H isotopes. *Mineral Deposits*, 21(2): 121 - 128 (in Chinese with English abstract)
- McNaughton NJ, Rasmussen B and Fletcher IR. 1999. SHRIMP uranium-lead dating of diagenetic xenotime in siliciclastic rocks. *Science*, 285: 78 - 80
- Nakai S, Halliday AN, Kesler SE and Jones HD. 1990. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley type ore deposits. *Nature*, 346: 354 - 357
- Nakai S, Halliday AN, Kesler SE, Jones HD, Kyle JR and Lane TE. 1993. Rb-Sr dating of sphalerites from Mississippi Valley Type (MVT) ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 417 - 427
- Peng JT, Hu RZ and Burnard PG. 2003. Samarium-neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikangshan antimony deposit (Hunan, China): The potential of calcite as a geochronometer. *Chemical Geology*, 200: 129 - 136
- Pettke T and Diamond LW. 1996. Rb-Sr dating of sphalerite based on fluid inclusion-host mineral isochrones: A certification of why it works. *Economic Geology*, 91: 951 - 956
- Quan H, Han QY and Ai YF. 1992. Poly-metal, gold and silver ore-forming and its perspective in Yanliao District. Beijing: Geological Publishing House, 60 (in Chinese)
- Shepherd TJ and Derbyshire DPF. 1981. Fluid inclusion Rb-Sr isochrones for dating mineral deposits. *Nature*, 290(16): 578 - 579
- The National Geological Isotopic Ages Album Editing Group. 1983. The national geological isotopic ages album (the third). Beijing: Geological Publishing House, 30 - 31 (in Chinese)
- Wang JW, Tatsumoto M, Li XB, Wayne RP and Edward CT. 1994. A precise $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$ chronology of fine-grained monazite: Age of the Bayan Obo Re-Fe-Nb ore deposit, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 3155 - 3169
- Wei JH, Liu CQ and Liu GC. 2003. Method of dating of gold deposit and the related problems. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 319 - 326 (in Chinese with English abstract)
- Wu ZH and Meng XG. 1998. Gold and poly-metal ore-forming and its relation to tectonics in Yanshan inland orogenic zone. Beijing: Geological Publishing House, 82 (in Chinese)

- Yang JH and Zhou XH. 2000. Rb-Sr isochron ages of the ore and gold-bearing minerals in Linglong gold deposit and its' ore-forming ages, eastern of Jiaozhou Peninsula. Chinese Science Bulletin, 45(4): 1547-1553 (in Chinese)
- York D, Masliwec A, Kuybida P, Hanes JA, Hall CM, Kenyon WJ, Spooner ETC and Scott SD. 1982. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of pyrite. Nature, 300: 52-53
- Zhai MG, Zhu RX, Liu JM, Meng QR, Hou QL, Hu SB, Liu W, Li Z, Zhang HF and Zhang HF. 2004. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China Block. Science in China, Series D, 34(2): 151-159
- Zhang DQ and Sun GY. 1988. Granites in eastern China. Wuhan: China Geoscience University Publishing House, 15 (in Chinese)
- Zhang LC, Xiao WJ, Qin KZ, Qu WJ and Du AD. 2005. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance. Mineralium Deposita, 39(8): 960-969
- Zhang RB, Liu JM, Ye J and Li YB. 2003. C and O isotopic geochemistry of Shouwangfen copper deposit, Hebei Province. Mineral Resources and Geology, 17(2): 122-126 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XH, Yang JH and Zhang LC. 2002. Formation of super-scale gold deposits in Jiaodong as well as Mesozoic deep procession of lithosphere. Science in China Series D, 32(spell.): 11-20 (in Chinese with English abstract)
- 附中参考文献**
- 《全国同位素地质年龄数据汇编》编纂小组编. 1983. 《全国同位素地质年龄数据汇编》第三集, 地质出版社, 30-31
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚莉, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钼同位素地质年龄测定方法研究. 地质学报, 68(4): 339-347
- 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国. 2005. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿. 岩石学报, 21(5): 1317-1328
- 胡达骧, 罗桂玲. 1994. 河北张宣金矿区石英脉 Ar-Ar 年龄. 地质科学, 29(2): 158-191
- 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-钼年龄及其地质意义. 矿床地质, 15(4): 365-373
- 李华芹, 刘家齐, 杜国民, 魏林. 1992. 内生金属矿床成矿作用年代学研究: 以西华山钨矿为例. 科学通报, 37(12): 1109-1112
- 李志昌, 蔡红, 朱家平. 1994. 矿石、沉积岩年龄的直接测定. 地质地球化学, (1): 47-52
- 刘建明, 沈洁, 赵善仁, 霍卫国, 姜能. 1998a. 金属矿床同位素精确定年的方法和意义. 有色金属矿产与勘查, 7(2): 107-113
- 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 姜能, 霍卫国. 1998b. 成矿流体活动的同位素定年方法评述, 地球物理学进展, 13(3): 46-55
- 陆松年, 李怀坤, 李惠民. 1999. 矿地质事件的同位素年代学研究. 地质前缘, 6(2): 335-342
- 罗修全. 1979. 同位素稀释法测定放射成因铈的误差讨论. 见: 全国同位素地质会议论文集编辑小组编. 全国同位素地质会议论文集. 北京: 地质出版社, 95-106
- 骆万成, 伍勤生. 1987. 应用蚀变矿物测定胶东金矿的成矿年龄. 科学通报, 32(16): 1245-1248
- 毛景文, 郝英, 丁梯平. 2002. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧同位素证据. 矿床地质, 21(2): 121-128
- 权恒, 韩庆云, 艾永富. 1992. 燕辽地区多金属、金、银成矿与远景. 北京: 地质出版社, 1992: 60
- 魏俊浩, 刘丛强, 刘国春. 2003. 金矿测年方法讨论及定年中存在的问题. 地质前缘, 10(2): 319-326
- 吴珍汉, 孟宪刚. 1998. 燕山陆内造山带金-多金属成矿作用与构造-成矿关系. 北京: 地质出版社, 82
- 杨进辉, 周新华. 2000. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代. 科学通报, 45(14): 1547-1553
- 张德全, 孙桂英. 1988. 中国东部花岗岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 15
- 张瑞斌, 刘建明, 叶杰, 李永兵. 2003. 河北寿王坟铜矿碳氧同位素地球化学特征及其意义. 矿产与地质, 17(2): 122-126
- 周新华, 杨进辉, 张连昌. 2002. 胶东超大型金矿的形成与中生代岩石圈深部过程. 中国科学(D辑), 32(增刊): 11-20