

文章编号: 0258-7106 (2006) 04-401-11

甘肃白银矿田变酸性火山岩锆石 LA-ICP-MS 测年 ——白银式块状硫化物矿床形成时代新证据*

何世平^{1,2}, 王洪亮^{2,3}, 陈隽璐^{1,2}, 徐学义², 张宏飞¹, 任光明², 余吉远²

(1 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2 中国地质调查局西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054;

3 西北大学地质系, 陕西 西安 710069)

摘 要 结合阴极发光, 对白银矿田与成矿密切相关的变酸性火山岩中的锆石进行了 LA-ICP-MS (激光剥蚀等离子体质谱) U-Pb 同位素测年。获得变石英角斑岩内单颗粒锆石的微区 U-Pb 年龄分别为 (467.3 ± 2.9) Ma、 (414.2 ± 2.7) Ma, 糜棱岩化石英角斑岩内单颗粒锆石的微区 U-Pb 年龄分别为 (467.1 ± 2.2) Ma、 (435.9 ± 3.6) Ma 和 (412.6 ± 2.1) Ma。认为白银矿田变酸性火山岩的形成时代为中奥陶世, 由韧性剪切作用引起的糜棱岩化的时代为早志留世晚期, 主变质时代为早泥盆世早期。提出白银铜多金属矿床形成时代为中奥陶世。这一新认识, 对进一步深入研究北祁连造山带的构造演化过程以及白银式块状硫化物矿床的形成环境、找矿方向具有重要意义。

关键词 地球化学; 变酸性火山岩; 锆石 U-Pb 年代学; LA-ICP-MS; 白银矿田; 甘肃

中图分类号: P597+.3

文献标识码: A

A LA-ICP-MS U-Pb chronological study of zircons from meta-acidic volcanics in Baiyin orefield, Gansu Province: New evidence for metallogenic age of Baiyin type massive sulfide deposits

HE ShiPing^{1,2}, WANG HongLiang^{2,3}, CHEN JuanLu^{1,2}, XU XueYi², ZHANG HongFei¹,
REN GuangMing² and YU JiYuan²

(1 China University of Geoscience, Wuhan 430074, Hubei, China; 2 Xi'an Institute of Geology and Mineral Resource, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract

The Baiyin orefield is located in the eastern part of North Qilian Mountains, and its copper-polymetallic ore bodies are controlled strictly by meta-acid volcanic rocks. However, the long controversy on the problem of metallogenic epoch has hindered the further ore prospecting work. In this paper, cathodoluminescence image (CL) and LA-ICP-MS U-Pb isotope dating techniques were used to determine the metallogenic age. It is found that zircons from meta-acid volcanic rocks show features of magmatic zircon, characterized by rhythmic crystallization and main Th/U ratio of 0.4~0.8. Two main populations of zircons from meta-quartz keratophyre were obtained, giving average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of (467.3 ± 2.9) Ma and (414.2 ± 2.7) Ma, respectively. Meanwhile, three main populations of zircons from mylonitized quartz keratophyre were obtained, giving average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of (467.1 ± 2.2) Ma, (435.9 ± 3.6) Ma and (412.6 ± 2.1) Ma respectively. It is considered

* 本文得到中国地质调查局国土资源大调查研究项目(西北地区重要成矿带基础地质综合研究, 编号 1212010510416)的资助

第一作者简介 何世平, 男, 1963 年生, 副研究员, 主要从事大地构造、地球化学研究。E-mail: xaheshiping@cgs.gov.cn

收稿日期 2005-11-28; 改回日期 2006-02-24。许德焕编辑。

that the age of $(467.3 \pm 2.9) \sim (467.1 \pm 2.2)$ Ma is the formation time of meta-acid volcanic rocks, and hence the metallogenetic epoch should be Middle Ordovician. (435.9 ± 3.6) Ma and $(414.2 \pm 2.7) \sim (412.6 \pm 2.1)$ Ma are probably the ages of two geological events, i.e., mylonization related to ductile shearing and collision orogeny. The findings are of great significance in further research on the tectonic evolution of the North Qilian orogenic belt, the formation environment of the Baiyin type massive sulfide deposits, and the ore-prospecting directions.

Key words: geochemistry, meta-acid volcanic rocks, zircon U-Pb chronology, LA-ICP-MS, Baiyin orefield, Gansu

20 世纪 50 年代末以前,根据大区域对比,将白银地区含矿火山岩系定为中泥盆世(宋叔和, 1955)或泥盆纪^①。此后,随着白银矿田勘探采矿的活跃和研究工作的深入,在矿区外围采获多门类古生物化石,并进行了大量同位素测年,使该矿床形成时代的研究有了很大进展。然而,对其形成的确切时代仍存在争议,概括起来,目前主要有以下 3 种认识: ①依据矿区及其外围采获的三叶虫、腕足类、古杯类、牙刺类、海百合茎、节肢动物残片等化石,以及 Rb-Sr 等时线、单颗粒锆石 U-Pb、Pb-Pb、Sm-Nd 等时线同位素测年数据,将白银矿田含矿岩系的时代划归寒武纪或早、中寒武世^{②③}(宋叔和, 1959;西北地质科学研究所等, 1974;左国朝, 1985;夏林圻等, 1991;1996;1998;2001;彭礼贵等, 1995;李向民等, 2000;张汉成, 2001;郭原生等, 2001); ②根据矿区外围采获的三叶虫、笔石化石,以及全岩 U-Pb、Rb-Sr 等时线测年资料,将白银地区的含矿岩系划为早、中奥陶世^④(边千韬, 1989;尹观等, 1998); ③依据丰富的藻类化石及 Sm-Nd 同位素测年,认为白银厂火山岩的时代为震旦纪^{⑤⑥}(姜福芝, 1992)。

对该矿床形成时代认识的不统一,直接影响到区域找矿方向和战略部署。因此,准确限定该矿床的形成时代,阐明其后期演化的时限,是进一步寻找该类型矿床的关键问题之一。

本文选择该矿床的直接赋矿围岩——变石英角斑质岩石,进行多样品精细同位素测年,用以限定其形成时代,同时获得后期改造的时限信息。本项成

果不仅对进一步深入认识北祁连造山带构造演化历史和成矿地质背景具有重要意义,而且,对下一步寻找新的白银式块状硫化物矿床具有重要的借鉴作用。

1 地质概况和岩相学

甘肃省白银矿区位于北祁连造山带东段(图 1),主要由一套低绿片岩相变质火山岩系组成,岩石类型有变细碧岩、变辉绿岩、变角斑岩、变石英角斑岩、变石英角斑质凝灰岩、石英角斑质角砾(集块)岩及千枚岩等,前人称该岩石组合为“细碧角斑岩系”,区域构造线呈 NW-SEE 向。在强应变带,普遍受到后期韧性剪切作用的影响,发育透入性劈理带和相应的糜棱岩化,长英质矿物与片状矿物(绿泥石、绢云母)构成明显的显微成分层,劈理走向与区域构造线一致,与岩层走向大体一致,总体为 NW-SEE 向。矿区内共发现折腰山、火焰山 2 个含铜黄铁矿型矿床,以及小铁山、四个圈、铜厂沟 3 个黄铁矿型多金属矿床,其中规模较大的是折腰山、火焰山、小铁山 3 个矿床。前人研究认为,矿床生成于具双峰式特点的海相细碧角斑岩系中(夏林圻等, 1991;1996;1998),直接赋存于该岩系下部的长英质火山岩-石英角斑质岩石内,已知工业矿床的空间位置与古火山穹隆内古火山喷口的关系十分密切,产于火山喷口和火山喷口斜坡。

笔者在前人研究的基础上,选择矿化蚀变较弱

① 地质部 641 地质队, 1956. 白银厂矿区勘探成果报告书. 内部资料.

② 郭介人,等, 1991. 甘肃白银地区黄铁矿型铜、多金属矿床形成条件、成矿模式及找矿预测. 内部资料.

③ 严增礼,等, 1992. 白银厂含矿火山岩系层序、时代及构造研究报告. 内部资料.

④ 李瑾煊,等, 1982. 白银地区地质特征及其找矿远景的评价. 内部资料.

⑤ 胡守智, 1991. 北祁连山东部白银地区火山岩地质特征. 内部资料.

⑥ 甘肃省地质调查院第三地质调查所, 2003. 兰州市幅(J48C004002)1: 25 万区域地质调查报告. 内部资料.

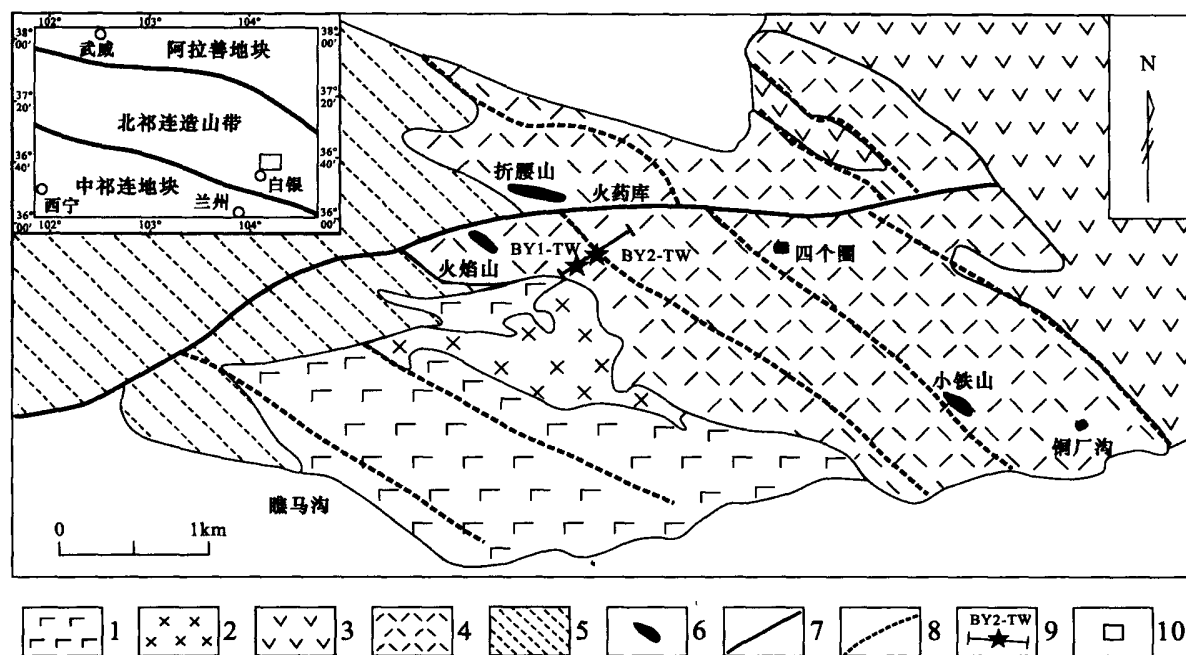


图 1 白银矿田地质略图(据王焰等, 2001 修编)

1—变细碧质岩系; 2—变辉绿岩; 3—变角斑质岩系; 4—变石英角斑质岩系; 5—千枚岩; 6—矿体; 7—断裂; 8—韧性剪切带;
9—剖面及采样位置; 10—研究区

Fig. 1 Geological sketch map of Baiyin orefield (after Wang et al., 2001)

1—Meta-splitic rocks; 2—Meta-diabase; 3—Meta-keratophyre series; 4—Meta-quartz keratophyre series; 5—Phyllite; 6—Ore body;
7—Fault; 8—Ductile shear zone; 9—Section and sampling location; 10—Study area

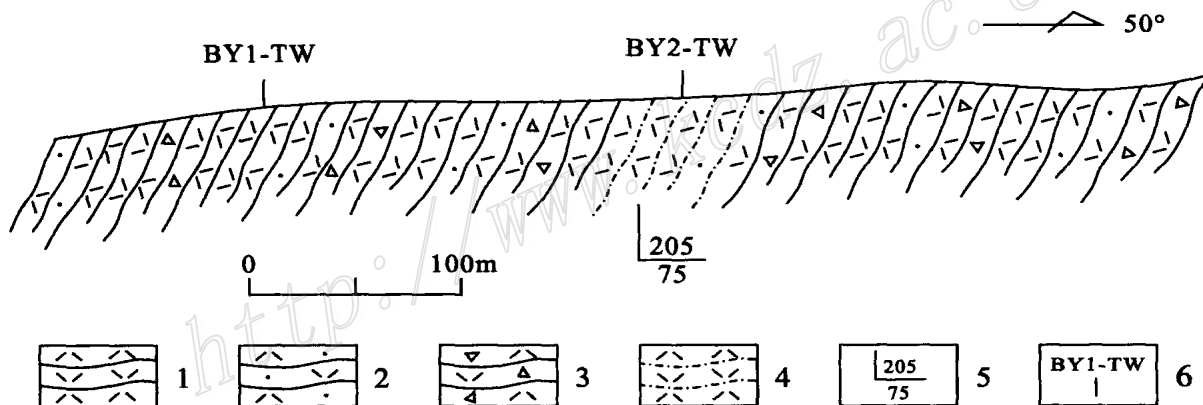


图 2 白银矿田火焰山东—火药库地质剖面图

1—变石英角斑岩; 2—石英角斑质凝灰岩; 3—石英角斑质角砾岩; 4—糜棱岩化石英角斑岩; 5—糜棱面理产状; 6—采样位置及编号

Fig. 2 Geological section of east Huoyanshan-Huoyaoku in Baiyin orefield

1—Meta-quartz keratophyre; 2—Quartz keratophyric tuff; 3—Quartz keratophyric breccia; 4—Mylonitized quartz keratophyre; 5—Attitude of mylonitic foliation; 6—Sampling location and its serial number

且离工业矿体较近的火焰山东—火药库地段(图 2)进行野外调研。调研地段出露的均为含矿围岩,岩性主要为:变石英角斑岩(含锰)石英角斑质凝灰岩及石英角斑质角砾岩,呈韵律产出,三者比例大体为

3: 6: 1, 普遍弱片理化,成分层与片理基本平行,总体向 S W 陡倾;强应变带发育糜棱岩化石英角斑岩,与周围岩石协调产出。

变石英角斑岩呈块状构造,弱片理化,变余斑状

结构,具蚀变现象。变余斑晶主要为弱绢云母化的钠更长石(10%±)和石英(5%±),粒径为0.8~3 mm。部分蚀变的钠更长石发育有较窄的净化边,个别具蠕虫结构。石英斑晶呈浑圆状,个别呈港湾状。变余基质绝大部分为微晶长英质矿物(85%±),以石英为主,含少量绢云母(5%±),微晶长英质矿物局部发生了定向重结晶作用。

石英角斑质凝灰岩呈块状构造,弱片理化,变余火山碎屑结构。碎屑为石英晶屑(10%~20%)、酸性斜长石晶屑(10%±)及少量酸性火山岩岩屑(5%~8%);基质主要为微晶长英质矿物(50%)和火山灰(20%±)。

石英角斑质角砾岩具火山碎屑结构。火山角砾主要为中—酸性火山岩(20%~30%),呈浑圆状或次棱角状,直径1~4.5 cm;胶结物为酸性凝灰质物质。

糜棱岩化石英角斑岩具片状构造,变余斑状结构,可见到S-C组构、“多米诺”构造、不对称拖曳褶皱及被拉长的不对称布丁构造。变余斑晶主要为绢云母化斜长石(25%±)和石英(10%±),因发生了较强的塑性变形和碎裂重结晶作用而呈强定向排列,粒径为2~5 mm。基质主要由呈定向排列的微晶长英质矿物(40%±)和纤维状绢云母(25%±)组成。

2 样品概述

本次研究采集了变石英角斑岩(样品号:BY1-TW)和糜棱岩化石英角斑岩(样品号:BY2-TW)2件样品,分别进行锆石U-Pb同位素测年,力图相互对比验证,精确限定白银铜多金属矿床的形成年龄,以及获取后期遭受改造的年龄信息。

BY1-TW样品为灰色变石英角斑岩。其采样位置的地理座标为E104°14′15.2″,N36°39′4.8″,高程为1836 m。样品具块状构造,弱片理化,变余斑状结构,弱蚀变,重约35 kg。

BY2-TW样品为灰色糜棱岩化石英角斑岩。其采样位置的地理座标为E104°14′22″,N36°39′11″,高程为1839 m。样品具片状构造,变余斑状结构,弱蚀变,重约38 kg。

将2个样品在实验室粉碎至80~100目,用常规的浮选和磁选法进行分选,各得200余粒锆石。在双目镜下挑选出晶型较完好的锆石作为测定对

象。变石英角斑岩(BY1-TW)中的锆石呈无色透明或浅玫瑰色的粒状、短柱状,粒径多介于80~200 μm之间。糜棱岩化石英角斑岩(BY2-TW)中的锆石也多呈无色透明或浅玫瑰色的粒状、短柱状,粒径稍大,多介于100~220 μm之间。将锆石样品置于DEVCON环氧树脂中,待固结后,抛磨至大小约为锆石粒径的二分之一,使锆石内部充分暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射光)照相、CL显微图像研究及LA-ICP-MS分析。

3 分析方法

锆石的阴极发光(CL)研究在北京大学信息科学技术学院扫描电镜实验室完成,采用FEI公司XL30型SFEG电子束进行锆石内部结构显微照相分析。测试点的选取,首先根据锆石反射光和透射光照片进行初选,再与CL照片反复对比,力求避开内部裂隙和包裹体,以获得尽可能丰富、准确的年龄信息。

LA-ICP-MS(激光剥蚀等离子体质谱)法单颗粒锆石微区U-Pb年龄测定在西北大学大陆动力学教育部重点实验室完成,采用Agilent 7500型ICP-MS和德国Lambda Physik公司的ComPex 102 ArF准分子激光器(工作物质ArF,波长193 nm)以及Micro Las公司的GeoLas 200 M光学系统联机进行。激光束斑直径为30 μm,激光剥蚀样品的深度为20~40 μm。实验中采用He作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质NIST SRM 610进行仪器最佳化,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一个点的跳峰方式,每完成4~5个测点的样品测定,加测标样一次。在对所测锆石样品分析了15~20个点前后,各测2次NIST SRM 610。锆石年龄采用国际标准锆石91500作为外标准物质,元素含量采用NIST SRM 610作为外标,²⁹Si作为内标。测试结果应用GLITTER(ver 4.0, Mac-quarie University)软件计算得出,并按照Andersen的方法(Andersen, 2002),用LAM-ICPMS Common Lead Correction(ver 3.15)对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用Isoplot(ver 3.0)完成(Ludwig, 1991)。详细分析步骤和数据处理方法请参见文献(Gao et al., 2002; 柳晓明等, 2002; 袁洪林等, 2003)。

4 分析结果和解释

依据 CL 图像,可将变石英角斑岩(BY1-TW)中的锆石分为 2 类:第 1 类占大多数,呈半自形粒状—短柱状,内部发育清晰的振荡环带结构(锆石点 5、9、12、19、22、23、25、26)(图 3A),具典型岩浆成因锆石的特征;第 2 类相对较少,呈半自形—他形短柱状,特征的环带结构不发育或不清晰(锆石点 11、13、24)(图 3A),内部多具斑杂状结构,表明可能遭受了后期变质作用的改造。2 类锆石的 Th/U 比值没有明显差别(表 1),一般在 0.42~0.87 之间,均显示出火山岩岩浆结晶锆石的特征。第 2 类锆石具有不同程度的放射性成因 Pb 丢失,表现为 U、Th 含量(^{238}U 平均值为 254.58×10^{-6} , ^{232}Th 平均值为 164.36×10^{-6})较第 1 类锆石(^{238}U 平均值为 202.76×10^{-6} , ^{232}Th 平均值为 115.50×10^{-6})偏高,这些锆石的放射性成因 Pb 的丢失,与岩石遭受后期变质作用有关。

糜棱岩化石英角斑岩(BY2-TW)中的锆石可分

为 3 类:第 1 类占多数,多呈半自形粒状—柱状,内部发育清晰的振荡环带结构(锆石点 4、8、9、18、20、25)(图 3B),具典型岩浆成因锆石的特征,部分锆石外部发育后期加大边(锆石点 8、9、18、25)(图 3B);第 2 类数量较少,呈半自形—他形柱状(锆石点 16、30),内部具较宽的条带状结构(锆石点 16)或宽缓的环带结构(锆石点 30)(图 3B),也表现出岩浆成因锆石的特征;第 3 类数量也较少,粒径相对较大,呈半自形粒状—柱状,内部具较窄的条带状结构(锆石点 17、19)(图 3B),或者内部为具振荡环带结构的岩浆成因锆石核而外部为较宽的变质加大边(锆石点 7)(图 3B),可能遭受了后期变质作用的改造。这 3 类锆石的 Th/U 比值有明显差别,从第 1 类(平均 0.699)至第 2 类(平均 0.506)到第 3 类(平均 0.449)依次降低(表 2),说明具有连续的演化过程,但均表现出岩浆结晶锆石的特征。第 2 类锆石的 U、Th 含量(^{238}U 平均值为 514.55×10^{-6} , ^{232}Th 平均值为 293.03×10^{-6})较第 1 类(^{238}U 平均值为 447.08×10^{-6} , ^{232}Th 平均值为 273.28×10^{-6})偏高;第 3 类锆石的放射性成因 Pb 的含量(^{206}Pb 平均

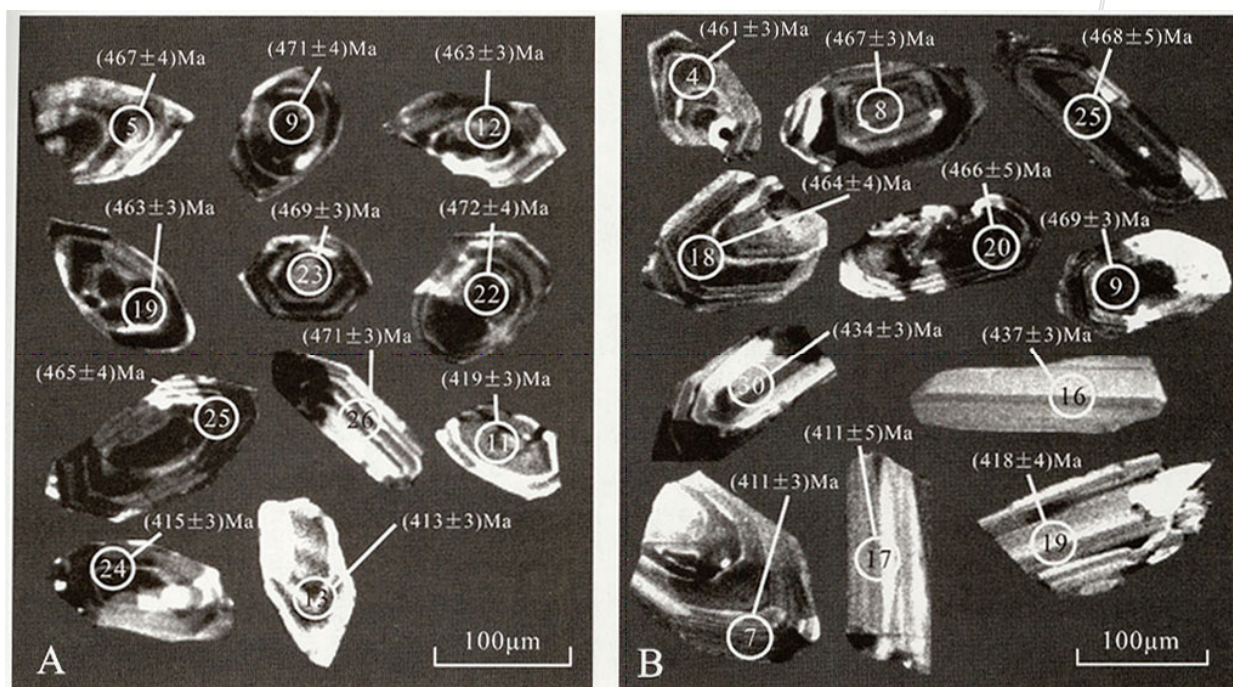


图 3 变石英角斑岩(BY1-TW)(A)和糜棱岩化石英角斑岩(BY2-TW)(B)锆石的阴极发光(CL)图像

圆圈中数字表示 U-Pb 分析点(编号与表 1、表 2 相同),其他数字表示 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄

Fig. 3 CL images of zircons from meta-quartz keratophyre (BY1-TW) (A) and mylonitized quartz keratophyre (BY2-TW) (B) in Baiyin orefield

Number in the circle represents the analysis sport of U-Pb, other number represents $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age

表 2 白银矿田糜棱岩化石英角闪岩(BY2-TW)单颗粒锆石 U-Pb 同位素测定结果
Table 2 U-Pb isotopic dating result of single-grained zircon from mylonitized quartz keratophyre in Baiyin orefield (BY2-TW)

样品 编号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$w(\text{B})/10^{-6}$		Th/U	
	比值	误差/ 1 σ	比值	误差/ 1 σ	比值	误差/ 1 σ	比值	误差/ 1 σ	比值	误差/ 1 σ	比值	误差/ 1 σ	比值	误差/ 1 σ	比值	误差/ 1 σ	207Pb	206Pb	232Th	238U
BY2-TW.1	0.0656	0.0014	0.6461	0.0124	0.0715	0.0005	0.0233	0.0003	682	57	484	10	443	3	438	3	7.58	7.64	142.36	320.31
BY2-TW.2	0.0590	0.0014	0.6132	0.0127	0.0754	0.0005	0.0228	0.0003	568	33	486	8	468	3	455	6	9.61	12.93	253.13	429.12
BY2-TW.3	0.0575	0.0014	0.5526	0.0125	0.0698	0.0005	0.0209	0.0003	509	36	447	8	435	3	419	6	9.34	10.62	233.91	457.66
BY2-TW.4	0.0608	0.0015	0.6221	0.0136	0.0742	0.0006	0.0248	0.0004	633	34	491	8	461	3	496	7	10.79	15.80	341.65	541.57
BY2-TW.6	0.0563	0.0012	0.5118	0.0094	0.0659	0.0004	0.0207	0.0002	465	29	420	6	411	3	415	4	13.41	20.29	444.13	734.74
BY2-TW.7	0.0573	0.0017	0.5195	0.0141	0.0658	0.0006	0.0228	0.0005	502	45	425	9	411	3	455	9	7.03	6.04	115.35	354.99
BY2-TW.8	0.0575	0.0011	0.5958	0.0095	0.0752	0.0005	0.0229	0.0002	510	24	475	6	467	3	458	4	8.91	16.36	319.08	414.97
BY2-TW.9	0.0563	0.0012	0.5860	0.0112	0.0755	0.0005	0.0237	0.0003	464	30	468	7	469	3	473	6	9.31	12.05	228.23	441.58
BY2-TW.10	0.0586	0.0013	0.6119	0.0118	0.0758	0.0005	0.0230	0.0002	552	30	485	7	471	3	460	5	8.32	12.96	251.5	376.95
BY2-TW.12	0.1065	0.0022	1.0163	0.0183	0.0692	0.0005	0.0393	0.0005	1740	21	712	9	431	3	779	10	23.03	27.74	385.13	598.49
BY2-TW.13	0.0660	0.0021	0.6403	0.0194	0.0704	0.0007	0.0268	0.0006	501	93	444	14	433	4	432	3	7.62	6.24	96.44	305.6
BY2-TW.14	0.0573	0.0012	0.5544	0.0100	0.0702	0.0005	0.0230	0.0003	502	28	448	7	437	3	459	6	7.55	8.48	170.33	391.72
BY2-TW.15	0.0595	0.0012	0.5405	0.0091	0.0659	0.0004	0.0213	0.0003	511	51	426	7	410	3	408	2	8.35	7.98	163.4	409.23
BY2-TW.16	0.0747	0.0014	0.7390	0.0120	0.0718	0.0005	0.0262	0.0002	488	73	445	11	437	3	436	2	30.83	48.72	835.76	1088.53
BY2-TW.17	0.0560	0.0025	0.5081	0.0215	0.0658	0.0008	0.0211	0.0006	452	73	417	14	411	5	422	12	4.65	4.88	96.45	244.68
BY2-TW.18	0.0590	0.0019	0.6075	0.0179	0.0746	0.0007	0.0252	0.0006	568	48	482	11	464	4	504	11	8.65	8.79	136.83	341.86
BY2-TW.19	0.0553	0.0018	0.5109	0.0157	0.0670	0.0006	0.0210	0.0005	426	52	419	11	418	4	420	10	7.87	7.92	153.66	370.42
BY2-TW.20	0.0614	0.0025	0.6352	0.0246	0.0750	0.0009	0.0291	0.0007	653	63	499	15	466	5	580	14	11.51	16.19	355.78	584.17
BY2-TW.21	0.0561	0.0020	0.5847	0.0201	0.0756	0.0008	0.0230	0.0005	456	58	467	13	470	5	460	10	10.07	14.53	314.43	512.74
BY2-TW.22	0.0585	0.0016	0.6069	0.0151	0.0752	0.0006	0.0227	0.0003	549	40	482	10	468	4	453	6	8.07	13.6	255.64	358.01
BY2-TW.23	0.0565	0.0016	0.5131	0.0139	0.0658	0.0006	0.0197	0.0004	473	45	421	9	411	3	394	8	8.4	8.49	170	398.92
BY2-TW.24	0.0575	0.0015	0.5253	0.0125	0.0663	0.0005	0.0202	0.0003	510	38	429	8	414	3	404	6	9.48	12.82	268.2	474.22
BY2-TW.25	0.0597	0.0021	0.6200	0.0205	0.0753	0.0008	0.0252	0.0006	594	54	490	13	468	5	502	11	10.31	13.86	276.52	469.87
BY2-TW.26	0.0596	0.0017	0.5470	0.0146	0.0666	0.0006	0.0203	0.0004	589	43	443	10	415	3	407	7	7.59	7.55	147.71	347.23
BY2-TW.27	0.0583	0.0015	0.5324	0.0125	0.0663	0.0005	0.0205	0.0003	540	38	433	8	414	3	409	6	8.64	10.27	214.23	439.9
BY2-TW.30	0.0570	0.0016	0.5474	0.0142	0.0696	0.0006	0.0220	0.0004	492	43	443	9	434	3	439	8	9.18	10.07	187.3	439.55

注: 应用 U/Th 进行普通铅校正。

值为 131.13×10^{-6} , ^{207}Pb 平均值为 8.38×10^{-6} , ^{208}Pb 平均值为 9.58×10^{-6} 较第 1 类 (^{206}Pb 平均值为 147.86×10^{-6} , ^{207}Pb 平均值为 9.56×10^{-6} , ^{208}Pb 平均值为 13.71×10^{-6}) 偏低。第 2 类和第 3 类锆石的放射性成因 Pb 的丢失或 U、Th 含量偏高,均与岩石遭受后期变质作用有关。

变石英角斑岩 (BY1-TW) 内锆石的 U-Pb 分析结果 (表 1) 表明,校正后的锆石有效数据点共 20 个,给出 2 组很好的谐和年龄数据。第 1 类具清晰振荡环带结构的锆石的测试点共 12 个 (2.3.5.9.12.14.19.22.23.25.26.28), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $(458 \pm 4) \text{ Ma} \sim (473 \pm 3) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.92), 加权平均年龄为 $(467.3 \pm 2.9) \text{ Ma}$ (MSWD = 1.8, 误差 2σ), 加权平均值的误差与单个分析误差基本一致,在谐和图内成群集中分布 (图 4A)。第 2 类锆石的测试点共 8 个 (7.8.11.13.18.21.24.27), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $(408 \pm 3) \text{ Ma} \sim (419 \pm 3) \text{ Ma}$ (MSWD = 1.4), 加权平均年龄为 $(414.2 \pm 2.7) \text{ Ma}$ (MSWD = 1.5, 误差 2σ), 加权平均值的误差与单个分析误差基本一致,在谐和图内也成群集中分布 (图 4B)。因此, $(467.3 \pm 2.9) \text{ Ma}$ 可解释为变石英角斑岩的形成年龄 (岩浆结晶年龄)。由于第 2 类锆石发生了不同程度的放射性成因 Pb 丢失,年龄值偏新,但给出了一组集中的年龄数据,因而, $(414.2 \pm 2.7) \text{ Ma}$ 可解释为岩石的变质年龄。

糜棱岩化石英角斑岩 (BY2-TW) 内锆石的 U-Pb 分析结果 (表 2) 表明,校正后的锆石有效数据点共 26 个,给出 3 组很好的谐和年龄数据。第 1 类发育

清晰振荡环带结构的锆石的测试点共 10 个 (2.4.8.9.10.18.20.21.22.25), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $(461 \pm 3) \text{ Ma} \sim (471 \pm 3) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.31), 加权平均年龄为 $(467.1 \pm 2.2) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.82, 误差 2σ), 加权平均值的误差与单个分析误差基本一致,在谐和图内成群集中分布 (图 5A)。第 2 类锆石的测试点共 7 个 (1.3.12.13.14.16.30), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $(431 \pm 3) \text{ Ma} \sim (443 \pm 3) \text{ Ma}$ (MSWD = 1.3), 加权平均年龄为 $(435.9 \pm 3.6) \text{ Ma}$ (MSWD = 1.6, 误差 2σ), 加权平均值的误差与单个分析误差基本一致,在谐和图内成群集中分布 (图 5B)。第 3 类锆石的测试点共 9 个 (6.7.15.17.19.23.24.26.27), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $(410 \pm 3) \text{ Ma} \sim (418 \pm 4) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.64), 加权平均年龄为 $(412.6 \pm 2.1) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.58, 误差 2σ), 加权平均值的误差与单个分析误差基本一致,在谐和图内成群集中分布 (图 5C)。因此, $(467.1 \pm 2.2) \text{ Ma}$ 可解释为糜棱岩化石英角斑岩的形成年龄 (岩浆结晶年龄)。同理,第 2 类和第 3 类锆石由于放射性成因 Pb 丢失或 U、Th 富集,造成年龄值偏新, $(435.9 \pm 3.6) \text{ Ma}$ 和 $(412.6 \pm 2.1) \text{ Ma}$ 可解释为 2 期变质年龄。

5 结论与讨论

LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 同位素测年结果表明,白银矿田直接赋矿围岩中变石英角斑岩 (BY1-TW) 和糜棱岩化石英角斑岩 (BY2-TW) 的形成年龄十分吻合, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值分别为

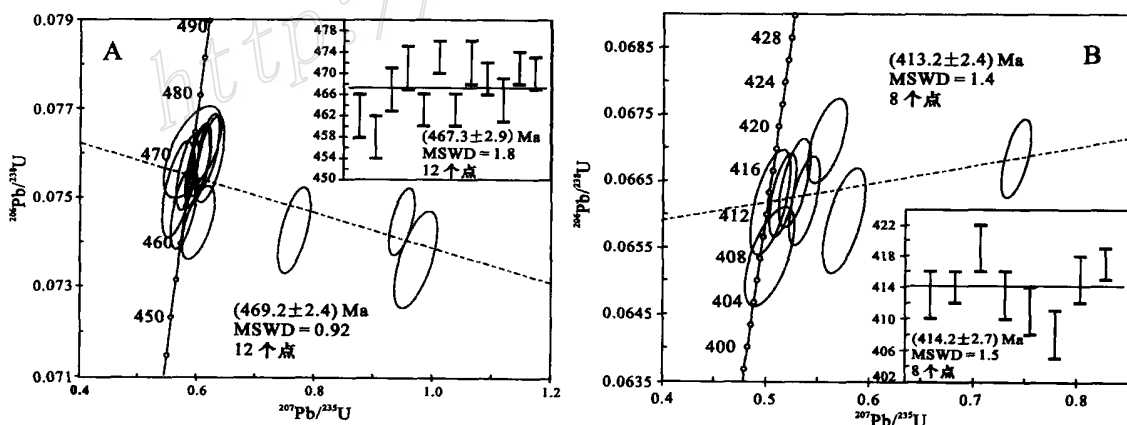


图 4 变石英角斑岩 (BY1-TW) 内锆石的 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram of zircons from meta-quartz keratophyre in Baiyin ore field

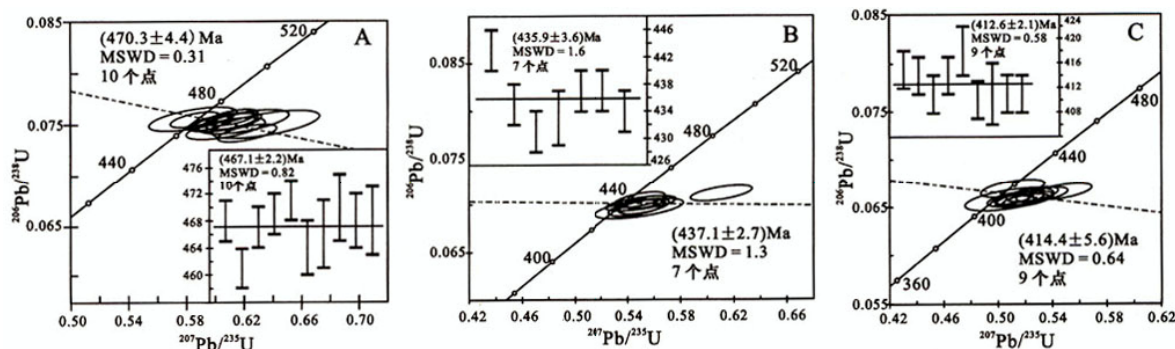


图5 糜棱岩化石英角斑岩(BY2-TW)内锆石的U-Pb谐和图

Fig. 5 U-Pb concordia diagram of zircons from mylonitized quartz keratophyre in Baiyin orefield

(467.3 ± 2.9) Ma 和 (467.1 ± 2.2) Ma, 属中奥陶世。2件样品均反映出一组十分相近的变质年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值分别为 (414.2 ± 2.7) Ma 和 (412.6 ± 2.1) Ma, 属早泥盆世早期。因此可认为, 白银铜多金属矿床的形成时代为中奥陶世, 并遭受了早泥盆世早期(晚加里东期)碰撞造山作用的强烈改造, 普遍发生低绿片岩相变质。

采自韧性剪切带内的糜棱岩化石英角斑岩明显反映出 (435.9 ± 3.6) Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值) 的构造事件年龄, 而韧性剪切带以外的变石英角斑岩并没有显示该年龄值。结合前人研究成果: 北祁连南缘右行韧性走滑剪切带内的糜棱岩形成于 440 ~ 380 Ma (戚学祥等, 2004); 北祁连洋于 486 ~ 445 Ma 洋壳向北俯冲, 并于 445 ~ 420 Ma 闭合 (许志琴等, 1997; 冯益民等, 1996; 夏林圻等, 1998; Wu et al., 1993; 张建新等, 1995), 由于祁连地块与阿拉善地块间斜向碰撞诱发大规模转换挤压作用, 北祁连南缘发生了大规模右行韧性走滑剪切运动。因此认为, (435.9 ± 3.6) Ma 应是白银矿田韧性剪切构造作用发生的时代, 属早志留世晚期。

白银铜多金属矿床除了受控于古火山机构外, 在区域上还受 NWW—SEE 向构造与 NE—SW 向构造叠加结点的控制。白银矿田以东, 甘肃省静宁县—张家川县一带黄土高原浅覆盖区之下埋藏有大量与白银含矿岩系同时代^{①②③}、岩性特征相似的变酸性火山岩系^④, 并且, 下伏有银川—昆明多期活动深大断裂系(在甘肃省称之为通渭—武都隐伏深大断

裂)(李百祥, 1997; 段永民, 2002)。甘肃省静宁—清水一带的和尚铺组(K_1hs)砂砾岩层内普遍含铜, 推测其铜来源于北祁连造山带东段奥陶系酸性火山岩的风化剥蚀产物。因此建议, 重视静宁县—张家川县一带黄土高原浅覆盖区之下受火山机构控制的白银式块状硫化物矿床的找矿工作。

致谢 衷心感谢西北大学地质系教育部大陆动力学重点实验室的柳小明教授和林慈奎等在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试中给予的热情指导。在工作与论文撰写过程中得到了冯益民研究员、张二册研究员、朱宝清研究员的指导与帮助, 在此表示诚挚的谢意。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59 ~ 79.
- Bian Q T. 1989. Geotectonics and metallogenic model of Baiyinchang ore-field [M]. Beijing: Seismological Press. 59 ~ 65 (in Chinese with English abstract).
- Duan Y M. 2002. Basic features of buried deep fault structure from Tongwei to Wudu [J]. *Acta Geologica Gansu*, 11(2): 24 ~ 28 (in Chinese with English abstract).
- Feng Y M and He S P. 1996. Geotectonics and orogeny of the Qilian Mountains, China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 12 ~ 135 (in Chinese with English abstract).
- Gao S, Liu X M and Yuan H L. 2002. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICP MS [J]. *Geostand Newsl.*, 22: 181 ~ 195.

① 甘肃省地质调查院. 2004. 静宁县幅(148C001003)1: 25 万区域地质调查报告. 内部资料.

② 长安大学地质调查研究院, 甘肃省地质调查院. 2004. 天水市幅(148C002003)1: 25 万区域地质调查报告. 内部资料.

③ 陕西省地质调查院. 2003. 宝鸡市幅(148C002004)1: 25 万区域地质调查报告. 内部资料.

④ 何世平, 王洪亮, 任光明. 北祁连东段清水县早古生代变火山岩地球化学特征及其形成构造环境. 待刊.

- Guo Y S, Wang J R, Xie X L and Qin H Y. 2001. The characteristics of the quartz albitophyes from Baiyin mine fields ascertained by isotopes of Sm-Nd and Rb-Sr [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 13(1): 27 ~ 40 (in Chinese with English abstract).
- Jiang F Z and Wang Y W. 1992. New knowledge on geology of massive sulfide deposit in Baiyin orefield, Gansu Province [J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 1(3): 129 ~ 139 (in Chinese).
- Li B X. 1997. Explanation of the geophysical field of the West Qinling [J]. *Acta Geologica Gansu*, 6(2): 82 ~ 91 (in Chinese with English abstract).
- Li X M, Peng L G, He Q, Cai C L and Wang X A. 2000. Mineralization and ore-search model of Eastern deposit in Baiyin ore-field, Gansu Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 96 ~ 134 (in Chinese).
- Liu X M, Gao S, Yuan H L, Hattendorf B, Gunther D, Chen L and Hu S H. 2002. Analysis of 42 major and trace elements in glass standard reference materials by 193nm La-ICPMS [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 408 ~ 418 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 1991. Isoplot-A plotting and regression program for radiogenic-isotope data [J]. *US Geological Survey Open-File Report*, 39: 91 ~ 445.
- Northwest Institute of Geoscience, The Sixth Geological Party of Baiyin Non-ferrous Metals Corp., The First Regional Geological Surveying Party of Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. 1974. Geological characteristics of a pyrite-type deposit in Gansu Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 12 ~ 65 (in Chinese).
- Peng L G, Ren Y X, Li Z P, Liu X M, Li X M, Wang X A and Liu D L. 1995. A metallogenetic model for copper-poly metal deposits of Baiyinchang, Gansu Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 84 (in Chinese with English abstract).
- Qi X X, Zhang J X, Li H B and Cai J L. 2004. Geochronology of the dextral strike ductile shear zone in south margin of the Northern Qilian Mountains and its geological significance [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 469 ~ 479 (in Chinese with English abstract).
- Song S H. 1955. Characteristics and metallogenic law of pyrite-type copper deposits in Qilian Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 35(1): 34 ~ 46 (in Chinese with English abstract).
- Song S H. 1959. Discussion on "Nanshan Series" and "Gaolan Series" in the eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 39(2): 14 ~ 17 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Liu L, Zhang H P and Liu X M. 2001. Geochemical evidences of tectonic setting of volcanic rocks in Baiyin ore-field [J]. *Progress in Natural Sciences*, 11(7): 715 ~ 720 (in Chinese).
- Wu H Q, Feng Y M and Song S G. 1993. Metamorphism and deformation of blueschist belt and their tectonic implications in North Qilian Mountains [J]. *Metamorphic Geol.*, 11: 523 ~ 536.
- Xia L Q, Xia Z C, Ren Y X, Peng L G, Zhang C, Yang J H, Wang X A, Li Z P, Han S and Huang Z X. 1991. The marine volcanic rocks from Qinling and Qilian Mountains [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 1 ~ 239 (in Chinese with English abstract).
- Xia L Q, Xia Z C and Xu X Y. 1996. Lithogenesis of marine volcanic rocks from North Qilian Mountains [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 153 (in Chinese).
- Xia L Q, Xia Z C, Ren Y X, Zuo G C, Qiu J X, Peng L G, Wang D W, Yang W R, Wu J R, Xia W H, Qin G J and Yu P S. 1998. Volcanism and metallogenesis in Qilian Mountains and their adjacent areas [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 110 (in Chinese).
- Xia L Q, Xia Z C, Ren Y X, Xu X Y, Yang H Q, Li Z P, Yang J G, Li W Y, Zhao D H, Song Z B, Li X M and Yu P S. 2001. Tectono-volcanic magmatism and metallogenic dynamics of the Qilian Mountains [M]. Beijing: China University of Geosciences Press. 170 ~ 199 (in Chinese).
- Xu Z Q, Zhang J X, Xu H F, Wang Z X, Li H B, Yang T N, Qiu X P, Zeng L S, Shen K and Chen W. 1997. Ductile shear zones of main continental mountains chains of China and their dynamics [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 71 ~ 108 (in Chinese).
- Yin G, Zhang S F, Fan L M and Wan Y W. 1998. Isotope geochronology studies of the main geological events on the sulfide ore deposits and neighborhood in Baiyin, Gansu [J]. *Geology-Geochemistry*, (1): 6 ~ 14 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Wu F Y, Gao S, Liu X M, Xu P and Sun D Y. 2003. La-ICPMS zircon U-Pb age and REE of Cenozoic pluton in NE China [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 48(14): 1511 ~ 1520 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H C. 2001. The genesis of typical deposits in Baiyin area of Gansu Province [J]. *Journal of Southwest Institute of Technology*, 16(2): 42 ~ 48 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X and Xu Z Q. 1995. Caledonian subduction-accretionary complex/volcanic arc zone and its deformation features in the middle sector of North Qilian Mountains [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, (2): 154 ~ 163 (in Chinese with English abstract).
- Zuo G C. 1985. A discussion on the time of volcanic rock system for Baiyinchang pyrite-type polymetallic deposit in Gansu Province [J]. *Geology in China*, (3): 17 ~ 18 (in Chinese).

附中文参考文献

- 边千韬. 1989. 白银厂矿区地质构造及成矿模式[M]. 北京: 地震出版社. 59 ~ 65.
- 段永民. 2002. 通渭—武都隐伏深大断裂构造的一些基本特征[J]. *甘肃地质学报*, 11(2): 24 ~ 28.
- 冯益民, 何世平. 1996. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京: 地质出版社. 12 ~ 135.
- 郭原生, 王金荣, 解宪丽, 邱红英. 2001. 白银厂矿田石英钠长斑岩 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素特征及意义[J]. *甘肃科学学报*, 13(1): 37 ~ 40.
- 姜福芝, 王玉往. 1992. 白银矿田块状硫化物矿床几个地质问题的新认识[J]. *有色金属矿产与勘探*, 1(3): 129 ~ 139.
- 李百祥. 1997. 西秦岭地球物理场的地质解释[J]. *甘肃地质学报*, 6(2): 82 ~ 91.
- 李向民, 彭礼贵, 贺庆, 蔡春麟, 王兴安. 2000. 甘肃白银矿田东部矿床

- 成矿和找矿模式[M]. 北京: 地质出版社. 96 ~ 134.
- 柳小明, 高山, 袁洪林, Bodo Hattendorf, Detlef Gunther, 陈亮, 胡圣红. 2002. 193nm LA-ICP MS 对国际地质标准参考物质中 42 种主元素和微量元素的分析[J]. 岩石学报, 18(3): 408 ~ 418.
- 彭礼贵, 任有祥, 李智佩, 刘晓明, 李向民, 王兴安, 刘德利. 1995. 甘肃省白银厂铜多金属矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 84.
- 戚学祥, 张建新, 李海兵, 蔡金朗. 2004. 北祁连南缘右行韧性走滑剪切带的同位素年代学及其地质意义[J]. 地学前缘, 11(4): 469 ~ 479.
- 宋叔和. 1955. 祁连山一带黄铁矿型铜矿的特征与成矿规律[J]. 地质学报, 35(1): 34 ~ 46.
- 宋叔和. 1959. 关于祁连山东部的“南山系”和“皋兰系”[J]. 地质学报, 39(2): 14 ~ 17.
- 王焰, 刘良, 张洪培, 刘晓明. 2001. 白银矿田火山岩构造环境的地球化学证据[J]. 自然科学进展, 11(7): 715 ~ 720.
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 彭礼贵, 张诚, 杨静华, 王兴安, 李智佩, 韩松, 黄忠祥. 1991. 祁连-秦岭系海相火山岩[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 1 ~ 239.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 北祁连山海相火山岩岩石成因[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 153.
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 左国朝, 邱家骧, 彭礼贵, 王大为, 杨巍然, 郭介人, 夏卫华, 覃功炯, 于浦生. 1998. 祁连山及邻区火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 110.
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 徐学义, 杨合群, 李智佩, 杨建国, 李文渊, 赵东宏, 宋忠宝, 李向民, 于浦生. 2001. 北祁连山构造-火山岩浆-成矿动力学[M]. 北京: 中国地质大学出版社. 170 ~ 199.
- 西北地质科学研究所, 白银有色金属公司甘肃冶金地勘公司第六地质队, 甘肃地质局第一区测队. 1974. 甘肃省某黄铁矿型矿床地质特征. 铁铜矿产专辑第 2 集[M]. 北京: 地质出版社. 12 ~ 65.
- 许志琴, 张建新, 徐惠芬, 王宗秀, 李海兵, 杨天南, 邱小平, 曾令森, 沈昆, 陈文. 1997. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M]. 北京: 地质出版社. 71 ~ 108.
- 尹观, 张树发, 范良明, 万永文. 1998. 甘肃白银金属硫化物矿床及其主要地质事件的同位素地质年代学研究[J]. 地质地球化学, (1): 6 ~ 14.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 48(14): 1511 ~ 1520.
- 张汉城. 2001. 甘肃白银矿田典型矿床成因研究[J]. 西南工学院学报, 16(1): 42 ~ 48.
- 张建新, 许志琴. 1995. 北祁连中段加里东俯冲增生杂岩/火山弧及其变形特征[J]. 地球学报, (2): 154 ~ 163.
- 左国朝. 1985. 甘肃白银厂黄铁矿型多金属矿床火山岩系的时代[J]. 中国地质, (3): 17 ~ 18.