

河北涞源大湾锌钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义*

田林¹, 张志远^{1**}, 王志敏², 丁照月², 李天琦², 卢鸿鹏², 安跃辉², 胡华斌¹, 谢桂青³

(1 河北地质大学 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北 石家庄 050031; 2 河北省地质工程勘察院, 河北 保定 071051; 3 中国地质大学 科学研究院, 北京 100083)

摘 要 大湾斑岩-矽卡岩型锌钼矿床地处太行山北段成矿带中, 是该段重要的金属矿床之一。五台群板峪口组和长城系高于庄组为主要赋矿围岩, 锌钼矿体主要赋存在流纹斑岩体内及斑岩与围岩接触部位。文章对大湾矿床内 2 件赋矿流纹斑岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代测定, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别为 $(137.1 \pm 0.9) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.56, n=24$) 和 $(136.8 \pm 1.2) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.40, n=22$); 对矿区 4 件辉钼矿样品进行 Re-Os 定年, 得到加权平均年龄为 $(136.5 \pm 1.0) \text{ Ma}$, 等时线年龄为 $(136.1 \pm 2.3) \text{ Ma}$, 在误差范围内成岩成矿时代一致, 显示大湾锌钼矿床形成于早白垩世。大湾矿床中辉钼矿的 $w(\text{Re})$ 为 $5.816 \sim 16.484 \mu\text{g/g}$, 反映了矿床成矿物质来源具有壳幔混合特征。区内流纹斑岩和蚀变体系为进一步找矿勘查的有利标志。

关键词 地球化学; 锆石 U-Pb 测年; 辉钼矿 Re-Os 测年; 流纹斑岩; 大湾锌钼矿床; 太行山北段

中图分类号: P618.43; P618.65

文献标志码: A

Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of Dawan Zn-Mo deposit in Laiyuan County of Hebei Province and its geological significance

TIAN Lin¹, ZHANG ZhiYuan¹, WANG ZhiMin², DING ZhaoYue², LI TianQi², LU HongPeng², AN YueHui², HU HuaBin¹ and XIE GuiQing³

(1 Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2 Hebei Geological Engineering Exploration Institute, Baoding 071051, Hebei, China; 3 Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The Dawan porphyry-skarn Zn-Mo deposit is one of important metal deposits in the northern Taihang Mountain metallogenic belt. The Banyukou Formation of Wutai Group and the Gaoyuzhuang Formation of Changcheng System are the main country rocks of the mineralization related intrusive rocks. The Zn-Mo ore body mainly occurs in rhyolite porphyry and the contact zones of rhyolite porphyry and its country rocks. In this paper, the LA-ICP-MS zircon U-Pb analysis of the two rhyolite porphyry samples from the Dawan deposit yielded the weighted $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ mean ages as $(137.1 \pm 0.9) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.56, n=24$) and $(136.8 \pm 1.2) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.40, n=22$), respectively. Re-Os dating of four molybdenite samples show that the weighted mean age and isochron age are $(136.5 \pm 1.0) \text{ Ma}$ and $(136.1 \pm 2.3) \text{ Ma}$, respectively, which indicates that the Dawan deposit was formed in the

* 本文得到河北省自然科学基金(编号:D2020403060)、国家自然科学基金(编号:41925011)和河北省地质矿产勘查开发局项目(编号:454-0502-JBN 0HDV)联合资助

第一作者简介 田林, 女, 1996年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: 1805165282@qq.com

** 通讯作者 张志远, 男, 1989年生, 博士, 助理研究员, 主要从事金属矿床成矿规律研究。Email: zhangzhiyuanstone@163.com

收稿日期 2021-07-06; 改回日期 2021-08-24。秦思婷编辑。

Early Cretaceous. The $w(\text{Re})$ of molybdenite vary in the range of 5.816~16.484 $\mu\text{g/g}$, showing that they were derived from mixed crust and mantle sources. Rhyolite porphyry and porphyry-related alteration system in the Dawan deposit are the useful indication for prospecting and exploration of the same style mineralization in the region.

Key words: geochemistry, zircon U-Pb dating, molybdenite Re-Os dating, rhyolite porphyry, Dawan Zn-Mo deposit, northern Taihang Mountain

斑岩型钼矿床是中国最重要的钼矿类型,研究指出与流纹斑岩密切相关的斑岩型钼多金属矿床中,矿体与流纹斑岩岩体存在以下关系:矿体主要产于流纹斑岩与围岩接触带附近,少量赋存于斑岩体内(沈光银等,2011),或主要产于流纹斑岩体内,部分赋存于岩体与围岩接触带(陈伟军等,2015;王婧,2017)。目前,对与流纹斑岩密切相关的斑岩型钼多金属矿床成矿机制的研究还相对薄弱。精确的年代学研究有利于对成岩成矿作用进行深入解剖。

中生代古太平洋板块俯冲使华北克拉通发生破坏,软流圈的上涌使下地壳和岩石圈地幔发生部分熔融,造成中生代时期大规模的岩浆活动(Yang et al., 2003; 徐义刚,2006; Chen et al., 2009; 2013; Guo et al., 2013)。太行山北段是华北克拉通中部重要的成矿带之一,受控于克拉通构造演化及中生代板块活动,强烈的构造岩浆活动使得该带有大量的金属矿床形成,包括安妥岭钼矿床、大湾铋矿床、木吉村铜钼矿床、龙门钼矿床、石湖金矿等金属矿床(Cao et al., 2010; 马金虎等,2011; Niu et al., 2012; Gao et al., 2013; 者萌等,2014),显示了太行山北段在中国东部成矿带中不可或缺的重要地位(Zhu et al., 2011; Mao et al., 2014)。大湾铋矿是太行山北段具有代表性的斑岩-矽卡岩矿床之一,对其成矿及与成矿相关的岩浆岩进行精确的年代学研究,能为太行山北段成矿带中矿床成矿规律年代学格架的搭建提供重要信息。

涞源县大湾铋矿床位于河北省西部太行山北段重要的内生矿产集中区(张立敏,2013)。20世纪中期,在该地先后发现铋矿等金属矿体,1985年经河北省地质局批准对大湾矿区进行详查(成欢,2012)。区内富集大量的钼矿体、铋矿体、及铁等伴生矿体,探明储量27.66万吨钼、71.17万吨铋,平均品位分别为0.11%和3.73%(河北省地质工程勘察院,内部资料)。长期以来,地质工作者和研究者(涂勘,1986; 魏绮英等,1987; 马国玺,1995; 张德诚等,2013; 张立敏,2013; 马晓辉等,2014)侧重于对大湾铋矿床的

地质特征及找矿方面的探讨,指出该矿床具有“三位一体”的成矿模式,即在斑岩体内形成斑岩型矿体,斑岩与围岩接触带附近形成矽卡岩型矿体,远离接触带处形成热液脉型矿体(马国玺,1995; 丁海洋,2014)。但对大湾矿床年代学的研究较少,获得的矿区的成岩成矿年代范围较大(144.4~130.7 Ma)(黄典豪等,1996; 成欢,2012; Song et al., 2014)。其中,黄典豪等(1996)发表的辉钼矿 Re-Os 年龄为单点模式年龄,是否能代表大湾成矿年龄有待考证;成欢(2012)报道的 Rb-Sr 等时线年龄易受流体活动影响存在误差,且仅用平行样进行辉钼矿 Re-Os 测定所获得的年龄可信度低。因此,仍需对该矿床的成岩成矿时代进行精确厘定。本文在野外调查及前人研究工作的基础上,对大湾矿区内的与成矿密切相关的流纹斑岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代测定,与辉钼矿 Re-Os 同位素年代学分析相结合,确定了矿床的成岩、成矿时代,并对矿床物质来源进行了分析,为进一步探讨大湾矿床成岩与成矿作用之间的关系奠定了年代基础。

1 区域地质

华北克拉通经历了多阶段的构造演化和强烈的变质改造,大部分研究表示克拉通的东、西板块于 1.85 Ga 左右沿中部造山带拼合,并完成克拉通化(Zhao et al., 2001; 2012; Santosh, 2010)。元古代—古生代末,华北克拉通基本处于稳定状态,但自中生代以来发生了以中酸性岩浆为主的大规模岩浆活动,于燕山期最为强烈(翟明国等,2001)。中生代华北岩石圈经历的大规模强烈的壳幔相互作用使中国东部发生了大规模成矿事件,且成矿作用较为复杂(毛景文等,2005; 吴福元等,2008; Zhu et al., 2017)。

太行山北段是华北地区重要的多金属成矿带,该地区强烈的构造活动及复杂的地质特征对区内成岩成矿有重要的影响(图1)。区内褶皱、断裂发育,

大断裂主要为乌龙沟、紫荆关等,基本构造由NNE-NEE向的构造组成(图1),它们在太古代五台期已经形成,并于中生代发生活化(成欢,2012),对区内岩浆活动、金属矿床形成等有控制作用。复杂的地质条件导致区内地层十分发育,从新生界—太古界均有出露(图1)。太行山北段地区多期剧烈的构造活动为深部岩浆热液运动提供条件,从而形成大量岩浆岩,主要包括中太古代、中元古代及中生代岩体(曲凯,2012)。

中生代时期岩浆岩在太行山北段广泛分布,包括髫髻山组火山岩、次火山岩(闪长玢岩)、以中酸性岩为主的杂岩体(王安镇岩体、大河南岩体、赤瓦屋岩体和麻棚岩体),以及少量中性岩体等(Chen et al., 2009; Dong et al., 2013; Gao et al., 2013; Li et al.,

2013; 图1),于东、西两侧分布的NNE向紫荆关和乌龙沟断裂控制这些岩体的展布方向(喻学惠等, 1996; 图1)。

2 矿床地质

大湾锌钼矿床位于华北克拉通中部的太行山北段成矿带内,区内构造以断裂、褶皱为主。NW向、NE向大断裂分别展布于矿体南北两侧,乌龙沟断裂结构面(呈NNE向)贯穿矿区东、西两侧(图1)。矿区出露地层为太古代五台群板峪口组片麻岩、中上元古界长城系高于庄组白云岩和蓟县系雾迷山组白云岩,及少量新生界第四系松散堆积物(图2,图3)。岩浆岩主要为燕山期涞源杂岩体。矿区在燕山运动

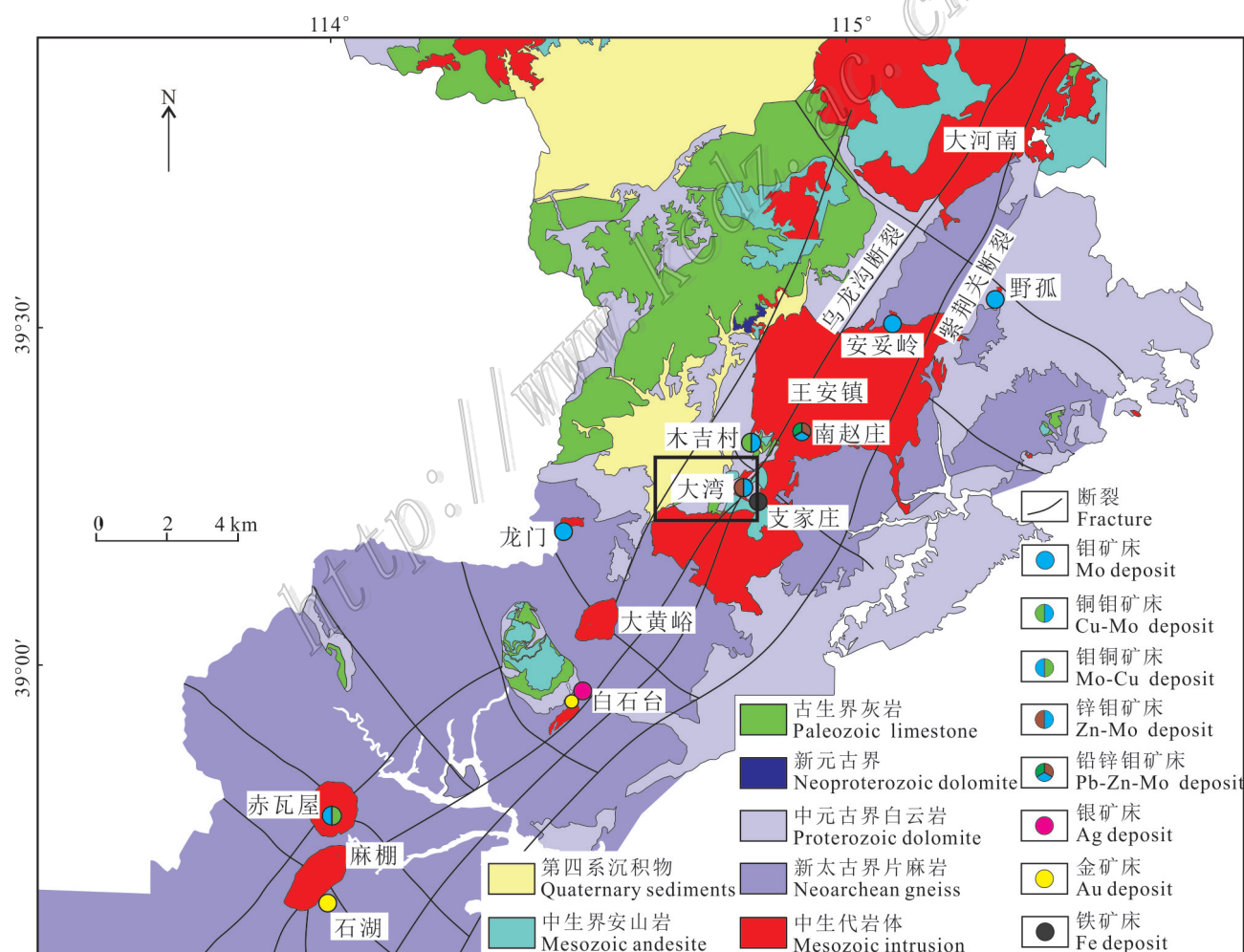


图1 太行山北段地质简图(改自曲凯,2012;王理瑞,2012;王丽红,2016;河北省地质工程勘察院,2018)

Fig.1 Simplified geological map of northern Taihang Mountain (modified after Qu, 2012; Wang, 2012; Wang, 2016; Hebei Geological Engineering Exploration Institute, 2018)

及深大断裂的影响下发生强烈岩浆活动,早期形成中酸性岩类岩石,包括石英闪长岩、花岗岩等(马国玺,1995),晚期形成酸性岩浆岩,主要为花岗斑岩、流纹斑岩等(图2,图3)。

花岗斑岩出露于矿区西缘,呈岩墙状与流纹斑岩相伴产出(图3)。流纹斑岩岩体沿矿区内NNE、NWW两个方向的断裂交汇处入侵,具有霏细状、角砾状、显斑状3种岩石类型,前两者构成主体相,角砾状者为隐爆作用的产物(黄水文,2014)。霏细状岩石出露于流纹斑岩岩体边部,角砾状岩石与霏细状岩石呈过渡接触,显斑状岩石于最晚零星产出(黄水文,2014)。

矿区锌钼矿体分布于流纹斑岩体内及斑岩与围岩接触部位,受控于流纹斑岩蚀变体系,包括斑岩热液蚀变和流纹斑岩与白云岩接触交代变质2个蚀变系统。流纹斑岩矿化蚀变体系具垂向环式分带性(张德诚等,2013):

(1) 斑岩热液蚀变。控制辉钼矿化,蚀变分带

自岩体下部向上依次为:①钾化带,金属矿物为辉钼矿、黄铁矿、磁铁矿等,非金属矿物为黑云母、石英、钾长石、绿泥石等;②硅化带,金属矿物为少量黄铁矿,非金属矿物为石英、绢云母、绿泥石等;③绿泥化带,金属矿物为黄铁矿、磁铁矿等,非金属矿物为阳起石、透闪石、绿泥石、绿帘石等。

(2) 斑岩与白云岩接触蚀变。控制闪锌矿化,蚀变分带依次为:①内矽卡岩带,矿物成分为透辉石、钙铁榴石、绿帘石;②外矽卡岩带,矿物成分为透辉石、粒硅镁石、透闪石、金云母等;③蛇纹石化白云岩带,矿物成分为蛇纹石、透辉石及少量透闪石,伴生磁铁矿、黄铁矿、闪锌矿;④铁锰碳酸盐化白云岩带,矿物成分为方解石、石英等,局部可见黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等。斑岩型钼矿体主要分布于矿床下(内)部斑岩体中部,矽卡岩型锌、钼矿体则在矿床上(外)部矽卡岩及蚀变白云岩中(图3)。

根据成矿元素的差异将矿床内矿石划分为锌矿石和钼矿石。其中,锌矿石分布于矽卡岩带和外带

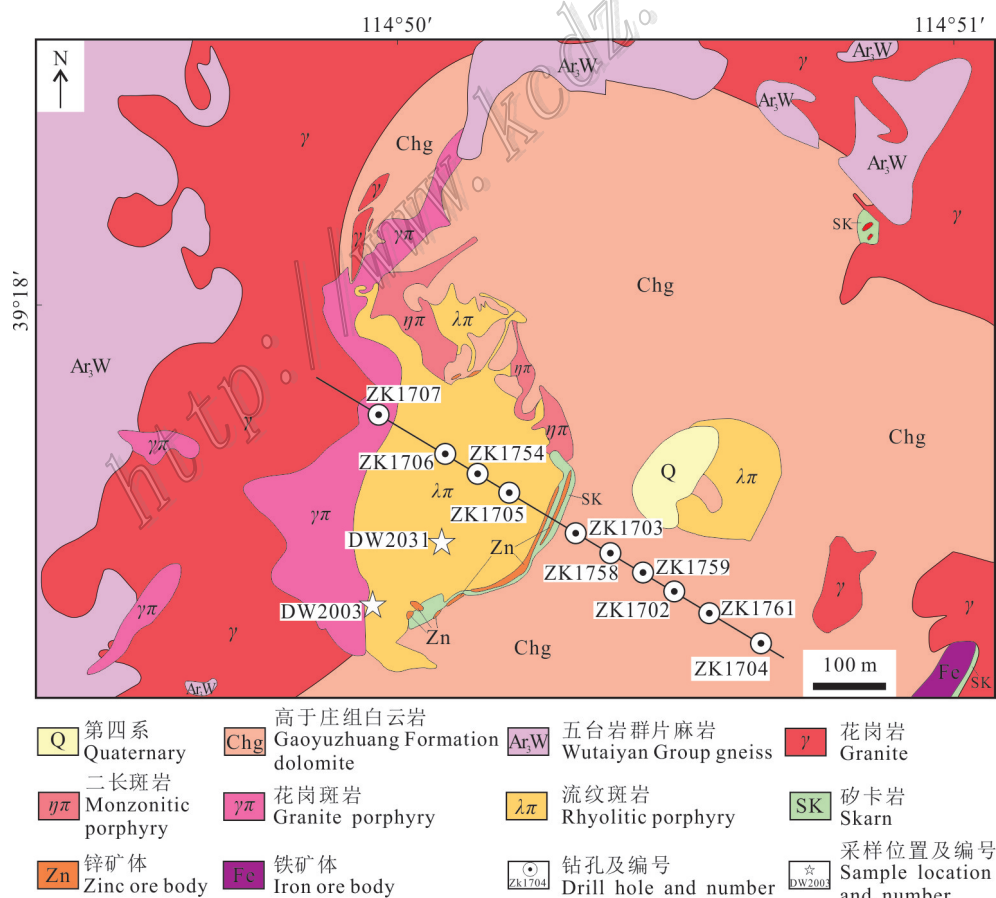


图2 大湾锌钼矿床地质简图(改自河北省地质工程勘察院,2010)

Fig.2 Geological map of the Dawan Zn-Mo deposit (modified after Hebei Geological Engineering Exploration Institute, 2010)

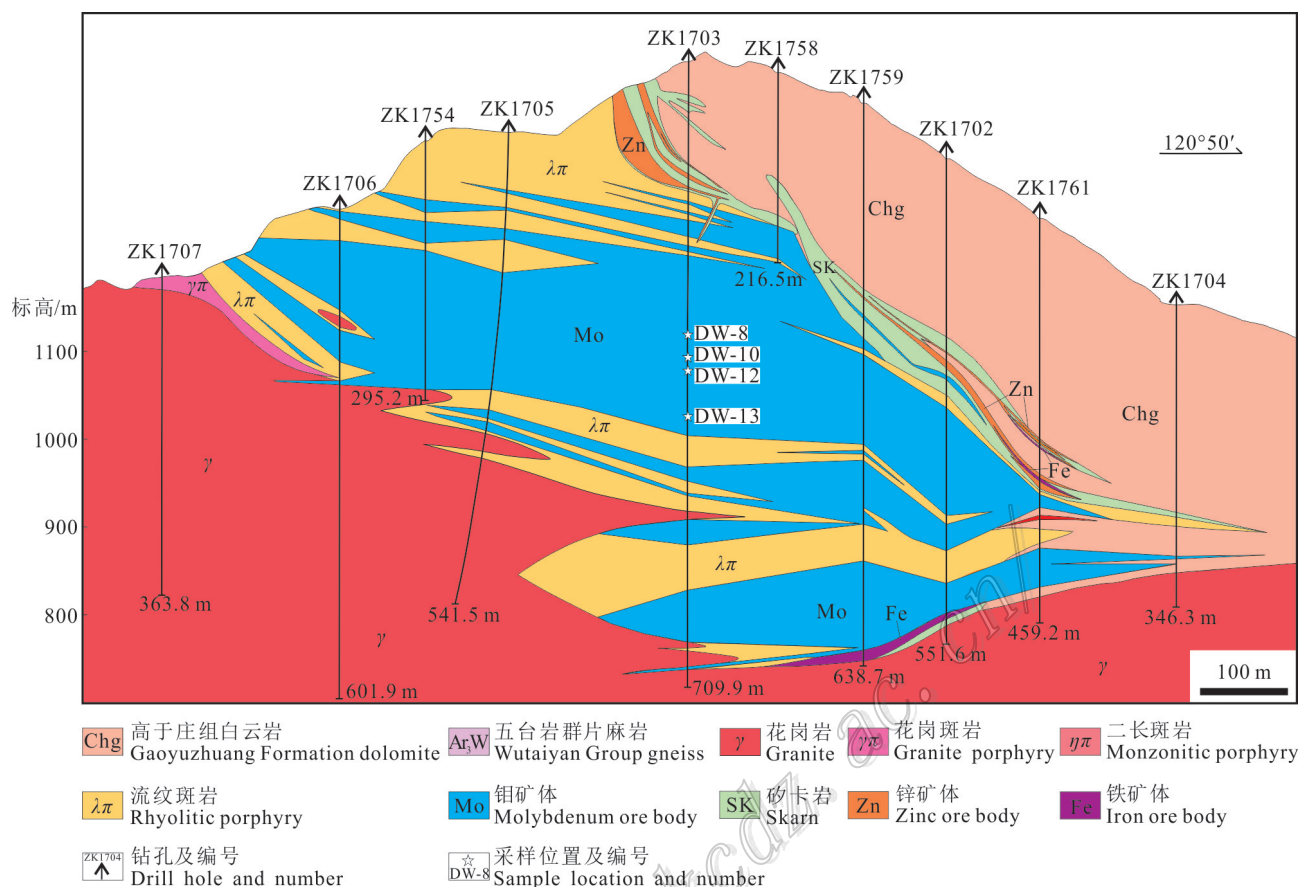


图3 大湾锌钼矿床17号勘探线地质剖面图(改自河北省地质工程勘察院,2010)

Fig.3 Cross section of No. 17 exploration line through the Dawan Zn-Mo deposit(modified after Hebei Geological Engineering Exploration Institute, 2010)

蚀变岩中,多呈自形-半自形粒状结构,浸染状构造为主,钼矿石在斑岩体内、矽卡岩带和外带蚀变岩中均可见,多呈他形-半自形粒状、鳞片状结构,以细脉浸染状、角砾状构造为主(图5a~d)。

3 样品采集与测试方法

3.1 锆石 U-Pb 测试

本次研究的2件新鲜的流纹斑岩样品(DW2003、DW2031)均采于大湾锌钼矿床地表(图2),岩石呈灰白色,具有斑状结构和显微粒状结构,岩石碎裂明显,网状裂隙发育,沿裂隙有碎粒、碎粉状长英质分布,常被次生石英、绢云母、不透明矿物充填交代(图4a、b)。斑晶为钾长石,半自形板状,粒径一般0.5~1.0 mm,星散状分布,被绢云母交代,基质为斜长石、钾长石、石英,部分斜长石被绢云母交代(图4c、d)。河北廊坊拓轩岩矿检测服务有限公司

对样品中的锆石进行处理:首先,将流纹斑岩样品人工破碎到70目左右,然后利用淘洗、重选等方法选取出重矿物,在双目镜下进行锆石颗粒的拣选工作。重点挑选出包裹体和裂隙少、晶型好、透明度高的锆石,然后用环氧树脂制靶、抛光,之后拍摄所制靶内锆石分别在透射光、反射光和阴极发光环境下的照片,从照片中圈定环带分明的锆石点位准备进行定年测试。

本次锆石 U-Pb 同位素定年测试在北京燕都中实测试技术有限公司进行,LA-ICP-MS为德国 Analytikjena M90,激光剥蚀系统为NWR193(Elemental Scientific Lasers LLC)。用He作载气、Ar为补偿气来调节激光剥蚀过程中的灵敏度,二者经过一个Y型连接口发生混合后进入ICP。本次研究选择30 μm作为剥蚀直径的长度。每次测试都包括50 s样品信号和大约25 s左右的空白信号。本次测试利用软件 ZSKits 完成,91500 及 Plesovice 标样均与推荐值契

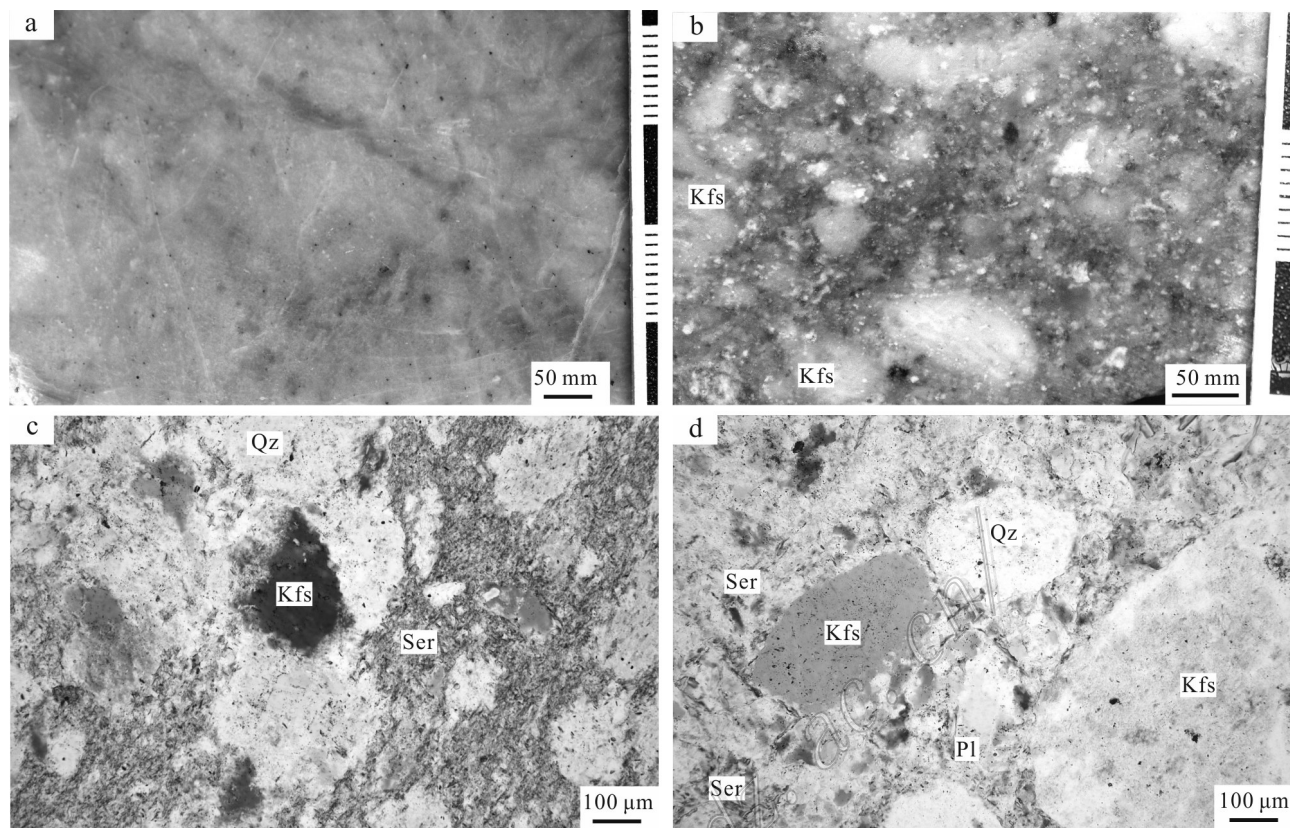


图4 大湾锌钼矿床流纹斑岩手标本和显微照片

a. 流纹斑岩;b. 流纹斑岩中钾长石斑晶;c. 石英、钾长石和绢云母共生(正交偏光);d. 石英、钾长石、绢云母和斜长石共生(正交偏光)
Qz—石英;Kfs—钾长石;Ser—绢云母;Pl—斜长石

Fig.4 Typical specimen photographs and photomicrographs of rhyolite porphyry from the Dawan Zn-Mo deposit

a. Rhyolite porphyry; b. K-feldspar phenocrysts in rhyolite porphyry; c. Quartz coexisting with k-feldspar and sericite (perpendicular polarized light);
d. Quartz coexisting with k-feldspar, sericite and plagioclase (perpendicular polarized light)
Qz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Ser—Sericite; Pl—Plagioclase

合, 91500 锆石年龄为 1065 Ma, Plesovice 锆石年龄为 (337.13 ± 0.37) Ma (Wiedenbeck et al., 1995; Slama et al., 2008)。锆石标准 91500 作外标, 进行 U-Pb 同位素年代测定中的同位素分馏校正。利用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003) 绘制锆石样品 U-Pb 年龄谐和图、计算年龄权重平均值, 使用 Andersen (2002) 的方法进行普通铅校正。

3.2 辉钼矿 Re-Os 测试

选取大湾矿区 ZK1703 钻孔内不同深度的 4 件钼矿石进行测试 (图 3), 矿石样品中可见脉状辉钼矿, 颜色呈铅灰色, 于脉石矿物 (如石英) 间隙中分布 (图 5a~d)。辉钼矿单矿物在河北廊坊拓轩岩矿检测服务有限公司进行分离, 在经过粉碎、分离、粗选和精选后获得, 其纯度 > 99%。单矿物晶体新鲜、无污

染, 符合测试要求。本研究选取细小的辉钼矿单矿物颗粒, 粒径大小介于 0.03~0.10 mm, 以避免大颗粒辉钼矿发生 Re-Os 失耦现象 (李超等, 2009), 防止造成测年误差。

在国家地质测试中心 Re-Os 同位素实验室对辉钼矿进行分析测试, 样品分离采用 Carius 管直接蒸馏法。实验分析流程及原理详见文献 (屈文俊等, 2003; 杜安道等, 1994; 2009; 李超等, 2010)。同位素比值利用 TJAX-series 电感耦合等离子体质谱仪进行测定, 该仪器为美国 TJA 公司生产的。用 TJAX-series ICP-MS 进行测量, Re、Os 和 ^{187}Os 的空白值分别为 0.0024 ng、0.000 36 ng、0.000 02 ng, 远低于本次实验的样品及标样中的 Re、Os 含量, 所以不会影响实验结果的准确性。最后, 采用

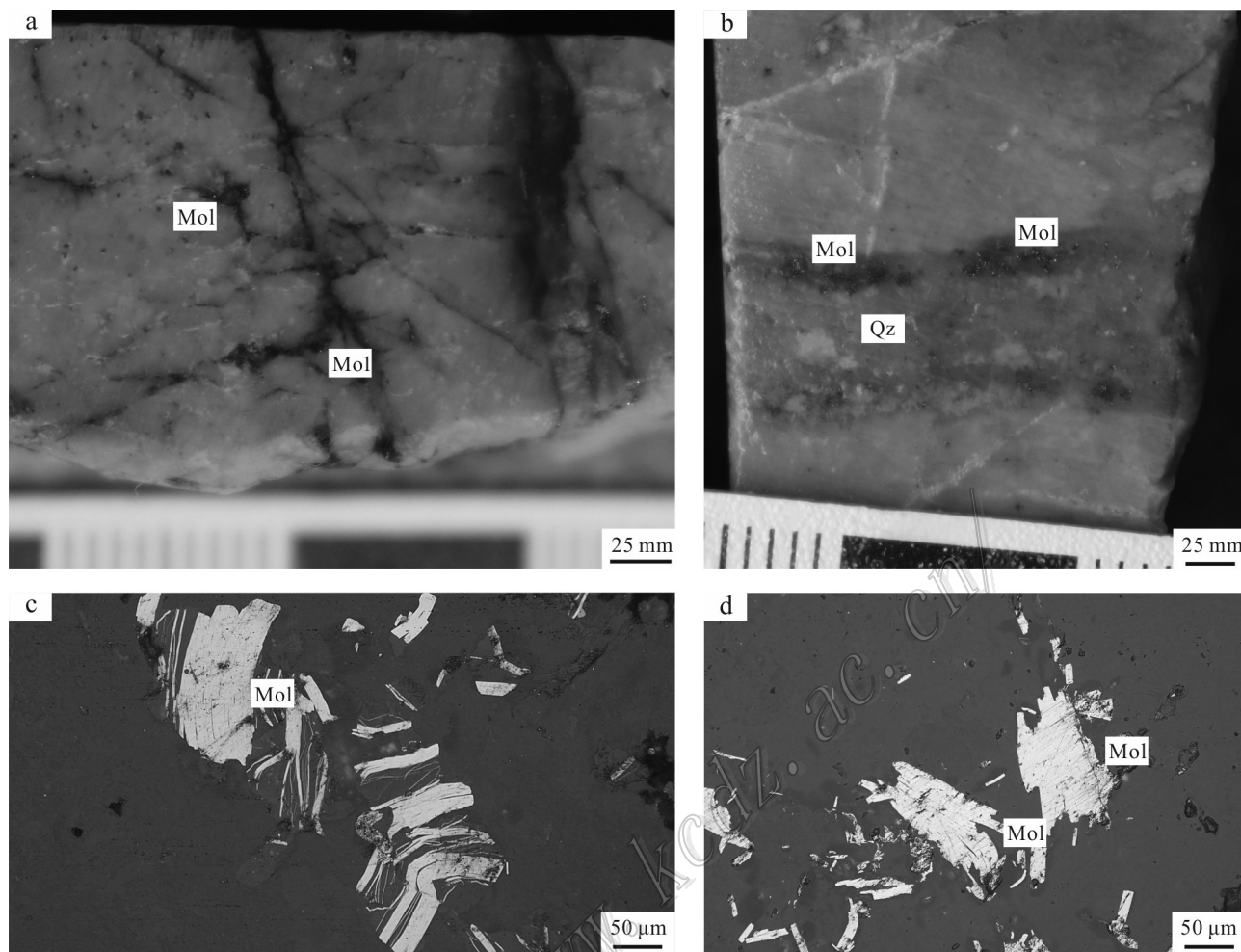


图5 大湾锌钼矿床典型矿石手标本和显微照片

a. 矿石中细脉浸染状辉钼矿;b. 矿石中脉状辉钼矿;c. 典型钼矿石显微照片(反射光);d. 典型钼矿石显微照片(反射光)

Mol—辉钼矿;Qz—石英

Fig.5 Typical specimen photographs and photomicrographs of ores from the Dawan Zn-Mo deposit

a. Veinlet and disseminated molybdenite in ore; b. Vein molybdenite in ore; c. Typical specimen photomicrographs of molybdenum ore (reflected light); d. Typical specimen photomicrographs of molybdenum ore(reflected light)

Mol—Molybdenite; Qz—Quartz

Isoplot 软件(Ludwig, 2009)对所得数据进行计算,从而得到辉钼矿等时线年龄,样品模式年龄运用 $t = 1/\lambda [\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]$ 公式计算,其中, $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Smoliar et al., 1996)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 测定结果

对采自大湾锌钼矿中的2件新鲜的流纹斑岩样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析,结果见表1。2件岩石样品(DW2003、DW2031)中的锆石形态

均为柱状自形晶,在锆石 CL 图像中可见清晰的韵律环带(图 6a、b),样品 DW2003 的锆石 Th/U 比值为 0.98~2.31,样品 DW2031 的锆石 Th/U 比值为 0.75~1.92,2件样品中锆石的 Th/U 比值均大于 0.4,且无明显波动,是典型的岩浆成因锆石(Corfu et al., 2003)。

样品 DW2003 流纹斑岩中 24 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 141.1~134.2 Ma,在年龄谐和图(图 7a)中,数据点成群分布,谐和年龄为 $(137.0 \pm 0.5) \text{Ma}$ (MSWD=0.48, $n=24$),加权平均年龄为 $(137.1 \pm 0.9) \text{Ma}$ (MSWD=0.56, $n=24$;图 7a),代表此岩石样品的结晶年龄。样品 DW2031 流纹斑岩中 22 颗锆石

表 1 河北涞源大湾铋矿床流纹斑岩铅石 U-Pb 年代学测试结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data for rhyolite porphyry from the Dawan Zn-Mo deposit

样品编号	$w(B)/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma			
	Pb	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
DW2003-1	3.36	106.59	139.25	1.31	0.1387	0.0101	0.0210	0.0005	131.8	9.0	134.2	2.9
DW2003-2	15.33	430.59	825.41	1.92	0.1466	0.0073	0.0211	0.0004	138.9	6.5	134.7	2.5
DW2003-3	16.79	571.65	561.57	0.98	0.1504	0.0065	0.0211	0.0004	142.3	5.7	134.8	2.4
DW2003-4	10.78	338.72	405.67	1.20	0.1512	0.0062	0.0212	0.0005	143.0	5.5	135.3	3.1
DW2003-5	12.23	391.66	402.78	1.03	0.1453	0.0071	0.0212	0.0004	137.7	6.3	135.4	2.5
DW2003-6	14.72	372.28	709.12	1.90	0.1445	0.0053	0.0212	0.0003	137.0	4.7	135.5	1.8
DW2003-7	19.95	535.43	1084.83	2.03	0.1480	0.0074	0.0213	0.0003	140.1	6.5	135.6	2.0
DW2003-8	19.30	494.11	1111.69	2.25	0.1464	0.0052	0.0213	0.0003	138.7	4.6	136.1	1.8
DW2003-9	10.79	329.52	418.82	1.27	0.1463	0.0055	0.0214	0.0003	138.6	4.8	136.7	2.2
DW2003-10	24.09	598.65	1383.08	2.31	0.1396	0.0039	0.0215	0.0004	132.6	3.5	136.9	2.5
DW2003-11	16.26	464.40	662.68	1.43	0.1426	0.0061	0.0215	0.0003	135.3	5.4	137.0	2.0
DW2003-12	13.71	404.57	691.00	1.71	0.1493	0.0088	0.0215	0.0005	141.3	7.8	137.2	3.2
DW2003-13	9.61	303.78	401.00	1.32	0.1449	0.0093	0.0215	0.0006	137.4	8.3	137.3	3.6
DW2003-14	12.44	388.23	396.30	1.02	0.1426	0.0034	0.0215	0.0003	135.4	3.0	137.3	2.1
DW2003-15	18.96	512.75	989.38	1.93	0.1441	0.0047	0.0216	0.0003	136.7	4.1	137.7	2.1
DW2003-16	20.20	536.74	1016.62	1.89	0.1475	0.0055	0.0216	0.0003	139.7	4.9	137.8	2.0
DW2003-17	13.89	360.86	652.99	1.81	0.1444	0.0056	0.0216	0.0003	137.0	5.0	138.0	1.9
DW2003-18	22.31	630.98	1120.98	1.78	0.1463	0.0051	0.0216	0.0004	138.7	4.5	138.1	2.6
DW2003-19	15.21	424.23	747.52	1.76	0.1429	0.0064	0.0217	0.0004	135.6	5.7	138.4	2.8
DW2003-20	21.22	557.82	1163.37	2.09	0.1463	0.0061	0.0217	0.0004	138.7	5.4	138.6	2.4
DW2003-21	2.85	77.61	116.71	1.50	0.1559	0.0123	0.0218	0.0006	147.1	10.8	139.2	3.7
DW2003-22	16.13	445.54	762.56	1.71	0.1548	0.0086	0.0219	0.0004	146.1	7.6	139.9	2.4
DW2003-23	9.10	267.76	336.55	1.26	0.1552	0.0060	0.0221	0.0004	146.5	5.2	141.0	2.2
DW2003-24	10.68	325.07	431.35	1.33	0.1421	0.0077	0.0221	0.0005	134.9	6.9	141.1	3.0
DW2031-1	5.38	173.06	217.88	1.26	0.1305	0.0080	0.0210	0.0004	124.5	7.1	134.0	2.8
DW2031-2	4.36	121.12	197.92	1.63	0.1467	0.0082	0.0210	0.0004	139.0	7.3	134.0	2.8
DW2031-3	3.60	132.42	99.67	0.75	0.1534	0.0096	0.0211	0.0006	144.9	8.5	134.3	3.9
DW2031-4	9.41	307.44	287.86	0.94	0.1471	0.0055	0.0211	0.0004	139.3	4.8	134.8	2.4
DW2031-5	4.02	126.08	125.26	0.99	0.1416	0.0100	0.0212	0.0005	134.5	8.9	135.5	3.4
DW2031-6	4.38	129.86	149.99	1.16	0.1490	0.0107	0.0213	0.0005	141.0	9.5	135.7	3.2
DW2031-7	9.51	268.10	532.48	1.99	0.1502	0.0085	0.0213	0.0005	142.1	7.5	135.7	3.0
DW2031-8	7.22	218.60	359.80	1.65	0.1442	0.0099	0.0213	0.0004	136.8	8.7	135.9	2.7
DW2031-9	3.09	94.65	129.51	1.37	0.1396	0.0145	0.0213	0.0005	132.7	12.9	136.1	3.2
DW2031-10	6.20	189.95	168.84	0.89	0.1523	0.0115	0.0214	0.0005	143.9	10.2	136.4	2.9
DW2031-11	1.65	53.58	57.23	1.07	0.1363	0.0141	0.0214	0.0006	129.7	12.6	136.6	3.5
DW2031-12	7.06	225.15	209.10	0.93	0.1471	0.0067	0.0214	0.0004	139.3	5.9	136.6	2.4
DW2031-13	3.16	106.90	96.23	0.90	0.1402	0.0078	0.0214	0.0004	133.2	6.9	136.7	2.7
DW2031-14	3.82	111.42	152.11	1.37	0.1511	0.0102	0.0215	0.0005	142.9	9.0	137.0	3.1
DW2031-15	5.00	134.49	257.59	1.92	0.1492	0.0086	0.0216	0.0005	141.2	7.6	137.5	2.9
DW2031-16	17.90	548.09	632.63	1.15	0.1447	0.0042	0.0216	0.0003	137.2	3.7	138.0	1.9
DW2031-17	2.96	85.27	100.08	1.17	0.1511	0.0103	0.0216	0.0004	142.9	9.1	138.1	2.6
DW2031-18	3.82	130.43	107.51	0.82	0.1387	0.0060	0.0217	0.0005	131.9	5.3	138.2	3.0
DW2031-19	4.64	133.65	208.78	1.56	0.1563	0.0110	0.0217	0.0006	147.5	9.7	138.4	3.5
DW2031-20	3.82	110.04	161.84	1.47	0.1525	0.0082	0.0220	0.0006	144.1	7.2	140.3	3.8
DW2031-21	2.31	62.08	107.30	1.73	0.1501	0.0133	0.0220	0.0005	142.0	11.7	140.5	2.8
DW2031-22	2.89	102.28	92.04	0.90	0.1479	0.0182	0.0222	0.0007	140.0	16.1	141.8	4.6

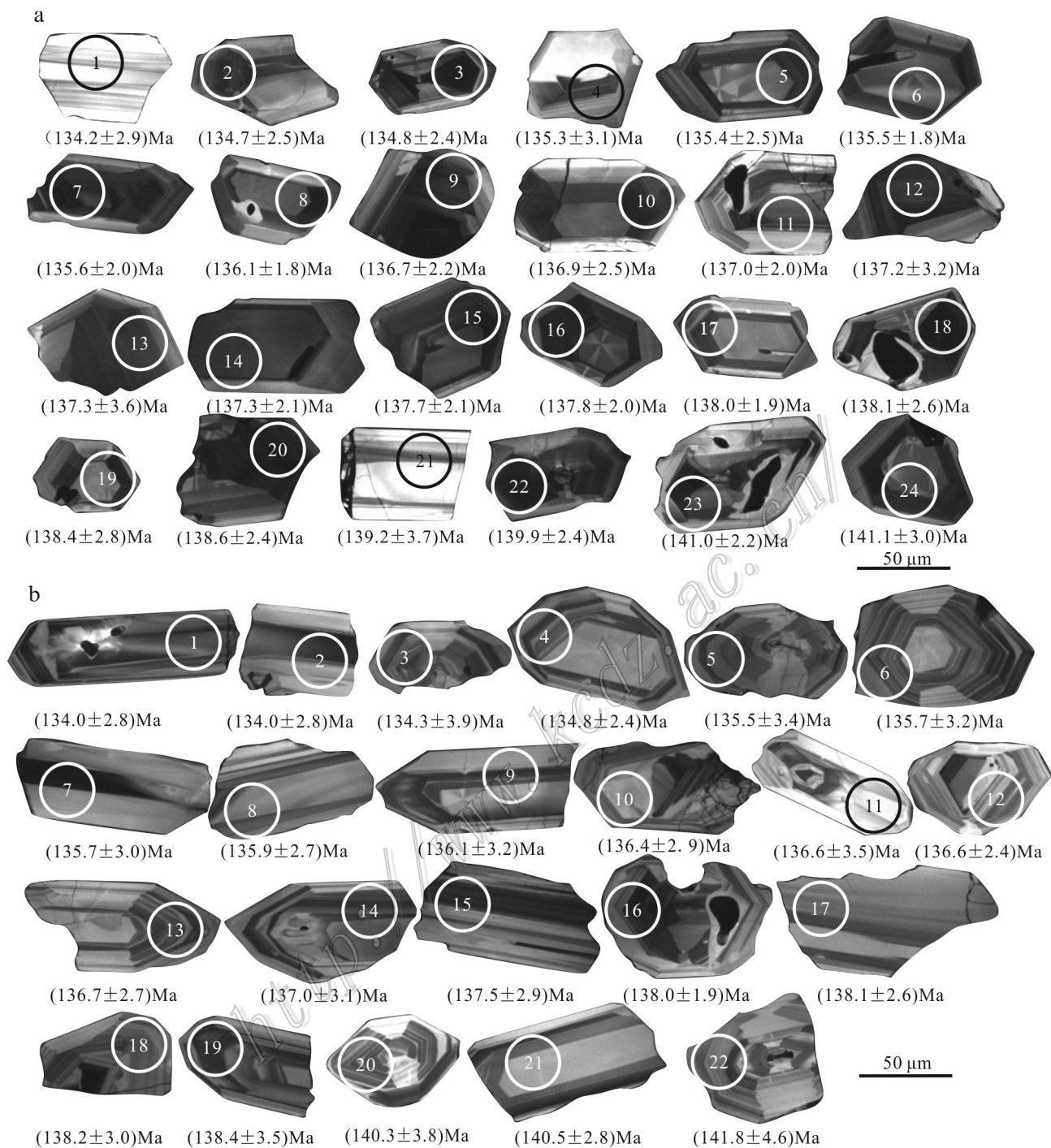


图6 大湾锌钼矿床流纹斑岩 DW2003(a)和 DW2031(b)锆石 CL 图像及测试位置

Fig.6 CL images of zircons and their measuring positions in the rhyolite porphyry DW2003 (a) and DW2031 (b) from the Dawan Zn-Mo deposit

的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于141.8~134.0 Ma,在年龄谐和图(图7b)中,数据点成群分布,谐和年龄为(136.8±0.6) Ma (MSWD=0.73, $n=22$),计算得到样品 DW2031 的加权平均年龄为(136.8±1.2) Ma (MSWD=0.40,

$n=22$;图7b),代表该样品岩石的结晶年龄。

4.2 辉钼矿 Re-Os 测年结果

本次研究所测4件辉钼矿样品的Re-Os 同位素数据见表2。实验测得辉钼矿的 $w(^{187}\text{Re})$ 为3656~

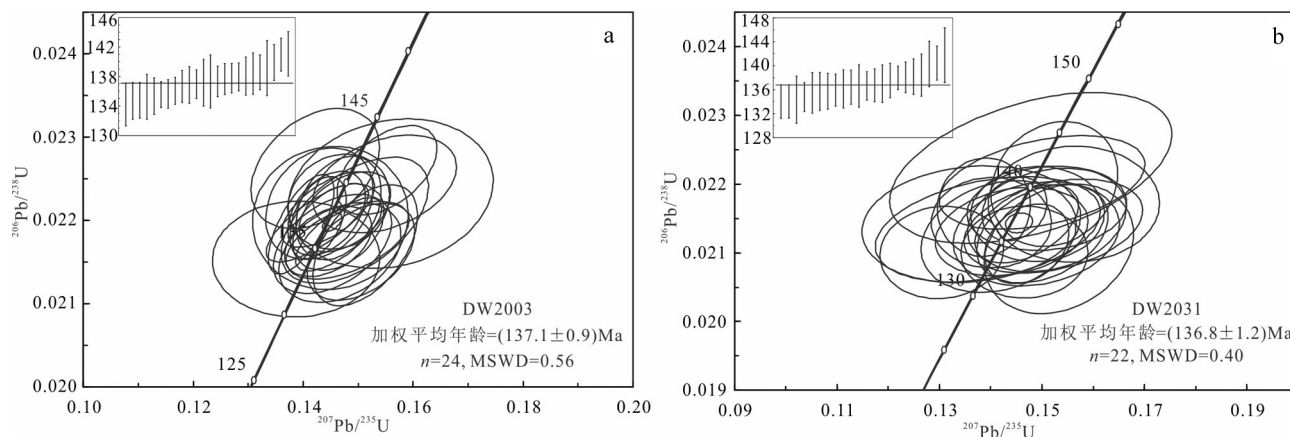


图 7 大湾锌钼矿床流纹斑岩 DW2003(a)和 DW2031(b)锆石 U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄

Fig.7 Concordia diagrams and weighed average ages of zircon U-Pb dating of the rhyolite porphyry in the Dawan Zn-Mo deposit

表 2 大湾锌钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素组成

Table2 Re-Os isotopic composition of molybdenite from the Dawan Zn-Mo deposit

样品编号	m/g	$w(\text{Re})/(\mu\text{g/g})$		$w(\text{普 Os})/(\text{ng/g})$		$w(^{187}\text{Re})/(\text{ng/g})$		$w(^{187}\text{Os})/(\text{ng/g})$		模式年龄/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
DW-8	0.02883	5.816	49	0.0252	0.0005	3656	31	8.32	0.06	136.4	2.0
DW-10	0.03191	16.484	167	0.0125	0.0006	10361	105	23.46	0.24	135.8	2.4
DW-12	0.02536	11.752	88	0.0121	0.0005	7386	55	16.78	0.12	136.2	1.9
DW-13	0.01233	8.907	64	0.0326	0.0007	5598	40	12.85	0.12	137.6	2.1

10361 ng/g, $w(^{187}\text{Os})$ 为 8.32~23.46 ng/g, 辉钼矿模式年龄介于 135.8~137.6 Ma。

将辉钼矿数据用 Isoplot 软件进行拟合, 获得等时线年龄为 $(136.1 \pm 2.3) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.19, n=4$; 图 8a), 计算得辉钼矿加权平均年龄为 $(136.5 \pm 1.0) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.52, n=4$; 图 8b)。对比计算所得的 2 个年龄一致, 说明分析结果可靠, 大湾矿床成矿年龄为 $(136.5 \pm 1.0) \text{ Ma}$ 。

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

封闭温度较高是锆石 U-Pb 及辉钼矿 Re-Os 都具备的特征, 不易被后期所发生的各种地质事件影响, 这 2 种测年手段的结合能相对精确的指示成岩成矿时代 (Stein et al., 2001; Fedo et al., 2003; Yuan et al., 2018)。对太行山北段一些矿床及岩体的研究显示,

成岩成矿作用在侏罗世—白垩世之间发生 (曹焱, 2012; Li et al., 2014; 张苏楠, 2014; 者萌等, 2014; 申志超等, 2015; 李瑞玲等, 2016), 说明该时期强烈的构造岩浆活动导致发生大规模成岩成矿事件。位于太行山北段的大湾锌钼矿床从发现至今, 已有研究者对其成岩成矿时代进行了分析讨论。其中, 黄典豪等 (1996) 利用 Re-Os 同位素对大湾矿床的成矿时代进行了研究, 得到了辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 $(144.4 \pm 7.4) \text{ Ma}$; 成欢 (2012) 利用 Rb-Sr 同位素测年法进行分析, 得到流纹斑岩等时线年龄为 139.7 Ma, 认为该年龄为岩石结晶年龄, 通过辉钼矿 Re-Os 测年得到矿床成矿时间为 137 Ma; Song 等 (2014) 利用锆石 U-Pb 测年法对所采集的流纹斑岩和石英二长岩样品进行实验分析, 得到岩石样品的加权平均年龄分别为 $(141.2 \pm 0.7) \text{ Ma}$ 和 $(130.7 \pm 0.6) \text{ Ma}$, 利用 Re-Os 同位素测年方法对辉钼矿进行年龄测定, 得到矿床成矿年龄为 $(138.0 \pm 2.0) \text{ Ma}$ 。综上所述, 前人的研

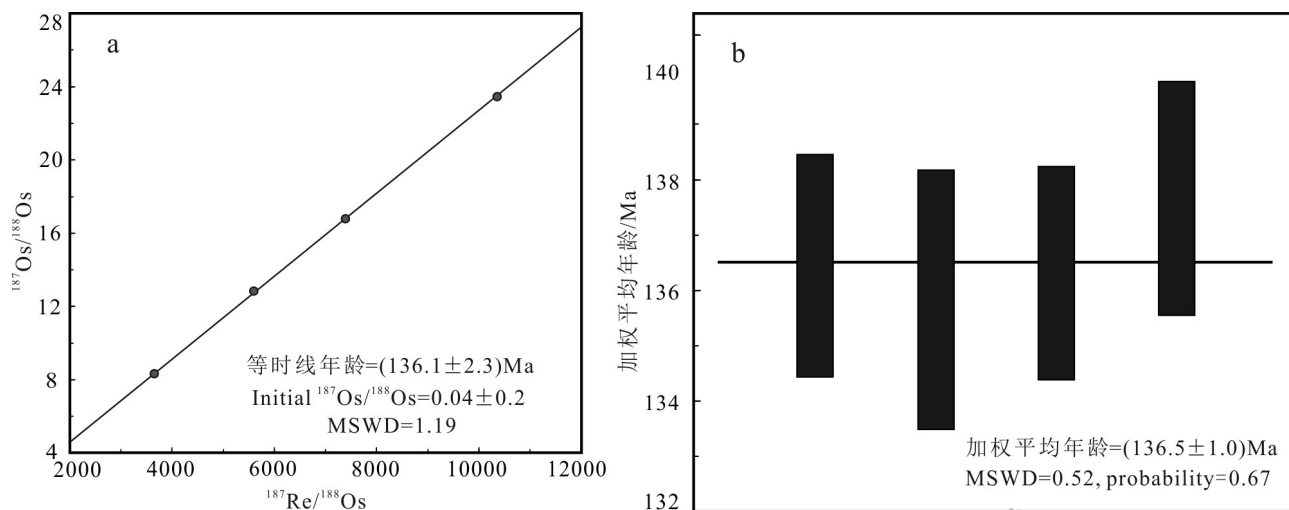


图8 大湾锌钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄(a)和加权平均年龄(b)

Fig.8 Re-Os isotopic isochron age (a) and weighted mean age (b) of molybdenite from the Dawan Zn-Mo deposit

究将大湾矿床的成岩成矿时代限定在早白垩世,但部分实验样品的采集位置不明、产状单一(成欢, 2012; Song et al., 2014),辉钼矿 Re-Os 测年仅用1件样品或只采用平行样进行(黄典豪等, 1996; 成欢, 2012),所得年龄结果准确性有待考证,因为 Rb-Sr 等时线年龄易受流体活动影响,所以学者成欢(2012)通过 Rb-Sr 同位素测年方法获得的年龄可能存在一定误差。

本次研究利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年法,对矿区的2件流纹斑岩样品(DW2003、DW2031)的年龄进行了分析研究,得到2件流纹斑岩样品的结晶年龄分别为 $(137.1 \pm 0.9)\text{Ma}$ 和 $(136.8 \pm 1.2)\text{Ma}$,二者在误差范围内一致。对辉钼矿进行 Re-Os 同位素定年得到加权平均年龄为 $(136.5 \pm 1.0)\text{Ma}$,等时线年龄为 $(136.1 \pm 2.3)\text{Ma}$ 。大湾锌钼矿床斑岩体和矿体存在紧密共生关系,在形成时间上相对一致,成岩成矿作用发生在早白垩世。

5.2 成矿物质来源

Re-Os 同位素除了能测定地质事件发生的时间外,还对成矿物质来源有示踪作用(江思宏等, 2000)。本次研究获得大湾锌钼矿床中辉钼矿的 $w(\text{Re})$ 为 $5.816 \sim 16.484 \mu\text{g/g}$, 计算平均值为 $10.740 \mu\text{g/g}$ 。随着辉钼矿 Re-Os 测年技术在金属矿床中的不断应用,学者们通过对不同研究成果中辉钼矿 Re-Os 数据进行分析得到了一定规律。通常认为,辉钼矿中 Re 含量由壳源-壳幔混源-幔源逐渐升高(Mao et al., 2003;

李书领等, 2017)。通过对各类钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 数据进行分析得到以下规律(Mao et al., 1999; 李文昌等, 2012):当辉钼矿的 $w(\text{Re})$ 为 $(1 \sim 10) \mu\text{g/g}$ 甚至更低时,成矿物质全部为地壳来源;当辉钼矿的 $w(\text{Re})$ 在 $(n \times 10) \mu\text{g/g}$ 时,成矿物质为壳幔混源;当辉钼矿的 $w(\text{Re})$ 多在 $(n \times 10 \sim 1000) \mu\text{g/g}$ 时,成矿物质来自于地幔或主要为地幔物质。陈衍景等(2012)对中国东部各类钼矿床内辉钼矿 Re 含量的分析指出,辉钼矿 Re 含量越高,幔源物质参与成矿作用越多。因此,笔者认为大湾锌钼矿床的成矿物质来源具有壳幔混合特征。

S、Pb 同位素研究是追踪矿床成矿物质来源的有效手段,前人对大湾矿床的硫化物开展了 S 同位素研究,结果显示, $\delta^{34}\text{S}$ 值主要在 $0 \sim 5\text{‰}$ 之间(马国玺, 1995; 成欢, 2012; 丁海洋, 2014),与岩浆硫的硫同位素组成基本一致(Seal, 2006),证明其硫源以岩浆硫为主,少量来自于围岩;对矿床内钼矿石和斑岩体进行 Pb 同位素研究,所得结论与硫同位素结果一致(马国玺, 1995; 成欢, 2012; 丁海洋, 2014)。大湾锌钼矿床成矿物质主要来源于壳幔混合,部分来源于围岩。

5.3 成岩成矿作用及对区域找矿勘查的指示

华北克拉通破坏受太平洋动力体系的影响,使华北地区构造格局发生转变、岩石圈减薄(王霞, 2012),破坏发生的峰期时间为早白垩世(Zhu et al., 2012)。中生代太行山北段成矿带内的中酸性岩是

由地幔物质上涌使下地壳发生部分熔融而形成的(蔡剑辉等, 2003; Chen et al., 2007)。下地壳的部分熔融对大湾矿区岩体形成贡献极大(成欢, 2012; Song et al., 2014)。因此, 笔者认为早白垩世时期, 强烈的构造活动使太行山北段乌龙沟深大断裂发生活化, 地幔物质上涌, 下地壳选择性熔融, 形成壳幔混源岩浆, 经深部分异作用, 局部形成中间岩浆房。在构造运动的多次挤压、拉张作用下, 大湾矿床内的流纹斑岩侵位于顶垂体构造环境, 随侵位、隐爆等成岩作用的发生, 区内形成一套完整的矿化蚀变体系(丁海洋, 2014), 作用于不同围岩, 产生斑岩型热液蚀变和矽卡岩型蚀变2套蚀变矿化组合。受不同蚀变矿化组合的影响, 在流纹斑岩及片麻岩内形成斑岩型钼矿, 在斑岩与围岩接触部位形成矽卡岩型锌钼等多金属矿体, 于远接触带处形成热液脉型锌钼等多金属矿体(马国玺, 1995)。

断裂构造体系既可以为岩浆侵位和流体运移提供通道, 同时也是提供成矿物质元素存储的必要场所(王亚民, 2016)。因此, 一些断裂系统是找矿勘查的重要构造标志, 太行山北段乌龙沟、紫荆关等大断裂附近有较好的找矿前景, 大湾矿床内除深大断裂外, 次级断裂构造也是找矿的重要标志。大湾矿床内高硅、富碱的流纹斑岩(黄水文, 2014)控制锌钼成矿, 受流纹斑岩蚀变体系的影响, 钼矿体主要赋存于流纹斑岩体内, 锌矿体主要赋存在流纹斑岩与围岩的接触带周围, 因此, 流纹斑岩垂向分带式的矿化蚀变体系也是大湾矿区进一步找矿的重要标志。

6 结 论

(1) 锆石 U-Pb 同位素年代学分析获得两件流纹斑岩样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $(137.1 \pm 0.9)\text{Ma}$ 和 $(136.8 \pm 1.2)\text{Ma}$, 对4件辉钼矿进行 Re-Os 同位素定年, 加权平均年龄为 $(136.5 \pm 1.0)\text{Ma}$, 等时线年龄为 $(136.1 \pm 2.3)\text{Ma}$, 误差范围内成岩成矿时代一致, 表明大湾矿区成岩成矿作用均在早白垩世。

(2) 大湾锌钼矿床中辉钼矿的 $w(\text{Re})$ 为 $5.816 \sim 16.484 \mu\text{g/g}$, 平均值为 $10.740 \mu\text{g/g}$, 壳幔混合源为矿床成矿物质的主要来源。

(3) 大湾锌钼矿床形成于挤压、拉张体制相互

转换的复杂构造环境中, 矿区内流纹斑岩和蚀变体系为找矿勘查的有利标志。

致 谢 野外工作得到了河北省地质工程勘察院的帮助和支持; 锆石 U-Pb 同位素分析得到北京燕都中实测试技术有限公司张晗工程师的帮助, 辉钼矿 Re-Os 同位素分析得到国家地质实验测试中心李超博士的帮助与指导; 两位审稿专家提出了宝贵的修改意见, 让本文质量有了很大提高; 在此一并表示衷心的感谢!

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79.
- Cai J H, Yan G H, Chang Z S, Wang X F, Shao H X and Chu Z Y. 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wangan-zhen complex discussion on its genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 81-92(in Chinese with English abstract).
- Cao Y, Li S R, Zhang H F, Ao C, Li Z Z and Liu X B. 2010. Laser probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for quartz from auriferous quartz veins in the Shihu gold deposit, western Hebei Province, North China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 29(4): 438-445.
- Cao Y. 2012. Mineralogical geochemistry and prediction for deep gold deposit in Shihu, western Hebei Province, North China (Doctoral Dissertation)[D]. Supervisor: Mao J W. Beijing: China University of Geosciences. 169p(in Chinese with English abstract).
- Chen B, Zhai M G and Tian W. 2007. Origin of the Mesozoic magmatism in the North China Craton: Constraints from petrological and geochemical data[J]. *Geological Society London Special Publications*, 280(1): 131-151.
- Chen B, Chen Z C and Jahn B M. 2009. Origin of mafic enclaves from the Taihang Mesozoic orogen, North China Craton[J]. *Lithos*, 110(1-4): 343-358.
- Chen B, Jahn B M and Suzuki K. 2013. Petrological and Nd-Sr-Os isotopic constraints on the origin of high-Mg adakitic rocks from the North China Craton: Tectonic implications[J]. *Geology*, 41(1): 91-94.
- Chen W J, Hao Q Q, Jiang X, Qin F and Chu S X. 2015. Diagenetic age of rhyolite porphyry in the Jiguanshan Mo deposit, Inner Mongolia and its geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 51(6): 1107-1113(in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Zhang C, Li N, Yang Y F and Deng K. 2012. Geology of the Mo deposits in Northeast China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science)*, 42(5): 1223-1268(in Chinese with English abstract).
- Cheng H. 2012. The metallogenic types characteristics and prospecting

- indicator of the molybdenite in Dawan, Laiyuan County, Hebei Province (Master Dissertation)[D]. Supervisor: Liu J C. Xi'an: Changan University. 88p(in Chinese with English abstract).
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O and Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469-500.
- Ding H Y. 2014. The analysis of geochemical characteristics, mineral fluid and material source of Dawan Mo deposit in the northern Taihang Mountain (Master Dissertation) [D]. Supervisor: Hu J Z. Beijing: China University of Geosciences. 53p(in Chinese with English abstract).
- Dong G C, Santosh M, Li S R, Shen J F, Mo X X, Steve S, Qu K and Wang X. 2013. Mesozoic magmatism and metallogenesis associated with the destruction of the North China Craton: Evidence from U-Pb geochronology and stable isotope geochemistry of the Muji-cun porphyry Cu-Mo deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 434-445.
- Du A D, He H L, Yin N W, Zou X Q, Sun Y L, Sun D Z, Chen S Z and Qu W J. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 339-347(in Chinese with English abstract).
- Du A D, Qu W J, Li C and Yang G. 2009. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 288-304(in Chinese with English abstract).
- Fedo C M, Sircombe K N and Rainbird R H. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 277-303.
- Gao Y F, Santosh M, Wei R H, Ma G X, Chen Z K and Wu J L. 2013. Origin of high Sr/Y magmas from the northern Taihang Mountains: Implications for Mesozoic porphyry copper mineralization in the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 143-159.
- Guo P, Santosh M and Li S R. 2013. Geodynamics of gold metallogeny in the Shandong Province, NE China: An integrated geological, geophysical and geochemical perspective[J]. *Gondwana Research*, 24(3-4): 1172-1202.
- Hebei Geological Engineering Exploration Institute. 2010. A checking report on the utilization status of resources in Dawan Zn-Mo deposit, Laiyuan County, Hebei Province[R]. (in Chinese).
- Hebei Geological Engineering Exploration Institute. 2018. A report on the optimization of prospecting targets for porphyry deposits in the middle and north part of Taihang Mountain[R]. (in Chinese).
- Huang D H, Du A D, Wu C Y, Liu L S, Sun Y L and Zou X Q. 1996. Metallochrology of molybdenum (-copper) deposits in the North China Platform: Re-Os age of molybdenite and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 15(4): 365-373(in Chinese with English abstract).
- Huang S W. 2014. The relationship between magmatic rocks and mineralization of the Dawan porphyry Mo deposit in the north of Taihang Mountain (Master Dissertation)[D]. Supervisor: Liu J C. Xi'an: Changan University. 61p(in Chinese with English abstract).
- Jiang S H, Nie F J and Zhao S M. 2000. An introduction to Re-Os isotopic system and its application to ore study[J]. *Geology of Inner Mongolia*, (2): 45-50(in Chinese with English abstract).
- Li C, Du A D and Qu W J. 2009. Decoupling of Re and Os and migration model of ^{187}Os in coarse-grained molybdenite[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 707-712(in Chinese with English abstract).
- Li C, Qu W J, Zhou L M and Du A D. 2010. Rapid separation of Osmium by direct distillation with Carius tube[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 29(1): 14-16(in Chinese with English abstract).
- Li Q, Santosh M, Li S R and Guo P. 2014. The formation and rejuvenation of continental crust in the Central North China Craton: Evidence from zircon U-Pb geochronology and Hf isotope[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95: 17-32.
- Li R L, Duan C, Chen Z K, Li W and Zhang Z Y. 2016. Zircon U-Pb age of granitoid from the Chiawawu Cu-W occurrence northern Taihang Mountain and its implications[J]. *Geology in China*, 43(5): 1761-1770(in Chinese with English abstract).
- Li S L, Li Y J, Wu L, Wang Z P, Wang Z Y and Zhang Y L. 2017. The molybdenite Re-Os isotopic dating of the Kekesala Fe-Cu deposit in West Tianshan, Xinjiang and its geological significance[J]. *Geology of Northwest China*, 50(4): 81-90(in Chinese with English abstract).
- Li S R, Santosh M, Zhang H F, Shen J F, Dong G C, Wang J Z and Zhang J Q. 2013. Inhomogeneous lithospheric thinning in the Central North China Craton: Zircon U-Pb and S-He-Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains[J]. *Gondwana Research*, 23: 141-160.
- Li W C, Yu H J, Yin G H, Cao X M, Huang D Z and Dong T. 2012. Re-Os dating of molybdenite from Tongchanggou Mo-polymetallic deposit in northwest Yunnan and its metallogenic environment[J]. *Mineral Deposits*, 31(2): 282-292(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot/Ex version 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[C]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA.
- Ludwig K R. 2009. Isoplot/Ex, version 2.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[C]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA.
- Ma G X. 1995. Geological characteristics of Dawan Zn-Mo deposit of Laiyuan, Hebei Province[J]. *Journal of Geology and Mineral Resources of North China*, 10(1): 64-76(in Chinese with English abstract).
- Ma J H, Han Z H, Xi L Y and Ge Z F. 2011. Geological characteristics and exploration direction of Longmen molybdenum deposit in Laiyuan County[J]. *Hebei Geology*, (4): 22-23(in Chinese).
- Ma X H and Ma J H. 2014. Metallogenic model and prospecting direction controlled by Dawan parietal pituitary structure[J]. *Geology*

- of Hebei, (4): 13-16(in Chinese).
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H and Du A D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo)deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11-12): 1815-1818.
- Mao J W, Wang Y T, Zhang Z H, Yu J J and Niu B G. 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. *Science in China (Series D)*, 46(8): 838-851.
- 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 in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169-188 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Pirajno F, Lehmann B, Luo M C and Berzina A. 2014. Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their corresponding tectonic settings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 576-584.
- Niu S Y, Ma G X, Chen Z K, Wang B D, Chen L J, Sun A Q, Ma X F, Zhang J Z, Ma B J, Chen C and Lu H P. 2012. Study on the ore-forming and ore-controlling structure of the Mujicun Cu(Mo) ore deposit, Hebei Province, China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 31(1): 1-14.
- Qu K. 2012. *Geology and mineralization in Mujicun porphyry Cu-Mo deposit, northern Taihang Mountain, China* (Master Dissertation) [D]. Supervisor: Dong G C. Beijing: China University of Geosciences. 70p(in Chinese with English abstract).
- Qu W J and Du A D. 2003. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with Carion tube sample digestion[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 22(4): 254-262(in Chinese with English abstract).
- Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: The role of double-sided subduction[J]. *Precambrian Research*, 178(1): 149-167.
- Seal R R. 2006. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 61(1): 633-677.
- Shen G Y and Xue Q P. 2011. Geological and geochemical characteristics of Yanshanian perthite rhyolite porphyry in Guyuan volcanic basin[J]. *Mineral Resources and Geology*, 25(5): 412-416+435(in Chinese with English abstract).
- Shen Z C, Hou Z Q, Yu F, Chen Z K, Li Q Y, Ma G X, Ge F and Wang Z M. 2015. SHRIMP zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the intermediate-acidic rocks of Wanganzhen complex in northern part of Taihang Mountains and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1409-1420(in Chinese with English abstract).
- Slama J, Kosler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hancher J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N and Whitehouse M J. 2008. Pleovite zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 249(1-2): 1-35.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group II A, III A, IV A and IV B iron meteorites[J]. *Science*, 271: 1099-1102.
- Song Y, Ding H Y, Qu X M, Wang R J, Zhou W and Wang S Z. 2014. Re-Os and U-Pb geochronology of the Dawan Mo-Zn-Fe deposit in northern Taihang Mountains, China[J]. *Resource Geology*, 64(2): 117-135.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L and Scherstén A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 13(6): 479-486.
- Tu K. 1986. Hydrothermal alteration and molybdenum mineralization of the Dawan molybdenum deposit, Laiyuan County, Hebei Province[J]. *Mineral Deposits*, 5(4): 49-61(in Chinese with English abstract).
- Wang J. 2017. *Geological characteristics and genesis discussed of the Dengshang molybdenum and pyrite deposit*[J]. *World Nonferrous Metals*, (8): 60+62(in Chinese).
- Wang L H. 2016. *Characteristics and genesis of the Geziling iron deposit in Laiyuan, Hebei Province* (Master Dissertation) [D]. Supervisor: Du Y S and Li S T. Beijing: China University of Geosciences. 51p(in Chinese with English abstract).
- Wang L R. 2012. *Geological and geochemical characteristics of Antuoling molybdenum deposit in Hebei Province* (Master Dissertation) [D]. Supervisor: Zhao G C. Beijing: China University of Geosciences. 107p(in Chinese with English abstract).
- Wang X. 2012. *Mesozoic magmatism and related metallogenesis in northern Taihang Mountains* (Master Dissertation) [D]. Supervisor: Dong G C. Beijing: China University of Geosciences. 80p(in Chinese with English abstract).
- Wang Y M. 2016. *Chaijiagou molybdenum Hebei geological characteristics and prospecting criteria research*[J]. *World Nonferrous Metal*, (18): 108+111(in Chinese with English abstract).
- Wei Q Y and Tu K. 1987. A study on the genetic relationship of Alabandite and Sphalerite in the Dawan Zn-deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(1): 74-77(in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Quadt A V, Roddick J C and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandards Newsletter*, 19: 1-23.
- Wu F Y, Xu Y G, Gao S and Zheng J P. 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145-1174(in Chinese with English abstract).
- Xu Y G. 2006. Formation of the Taihangshan gravity lineament by the diachronous lithospheric thinning of the North China Craton[J]. *Earth Science*, 31(1): 14-22(in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Wu F Y and Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the

- North China Craton: An association with lithospheric thinning[J]. *Ore Geology Reviews*, 23(3): 125-152.
- Yu X H, Ren J Y and Zhang J X. 1996. Copper gold metallogenic conditions and prospecting direction in the middle Taihang Mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-120(in Chinese).
- Yuan S D, Williams-Jones A E, Mao J W, Zhao P L, Yuan C and Zhang D L. 2018. The origin of the Zhangjialong tungsten deposit, South China: Implications for W-Sn mineralization in large granite batholiths[J]. *Econ. Geol.*, 113(5): 1193-1208.
- Zhai M G, Liu W J and Yang J H. 2001. Largescale gold ore concentration area and largescale mineralization in Jiaodong[J]. *Science in China(Series D)*, 31(7): 545-552(in Chinese).
- Zhang D C, Han X L, Zhang H, Li Z M, Liu L, Pan M M and Zhang L F. 2013. Analysis of metallogenic conditions of Dawan Zn-Mo deposit of Laiyuan, Hebei Province[J]. *Journal of Hebei Union University (Natural Science Edition)*, 35(3): 85-88(in Chinese with English abstract).
- Zhang L M. 2013. Geological characteristics and peripheral prospecting direction of Dawan zinc molybdenum deposit in Laiyuan[J]. *West-China Exploration Engineering*, 25(11): 111-114(in Chinese).
- Zhang S N. 2014. Geochemical characteristics and genetic mechanism of Wanganzhen complex in Taihang Mountains(Master Dissertation)[D]. Supervisor: Liu J C. Xi'an: Changan University. 73p(in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 107: 45-73.
- Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, Wilde S A, Sun M, Zhang J, He Y H and Yin C Q. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 55-76.
- Zhe M, Hu J Z, Zhou W and Ding H Y. 2014. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Antuoling molybdenum deposit in Hebei Province[J]. *Geoscience*, 28(2): 339-347(in Chinese with English abstract).
- Zhu R X, Chen L, Wu F Y and Liu J L. 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China (Earth Science)*, 54: 789-797.
- Zhu R X, Yang J H and Wu F Y. 2012. Timing of destruction of the North China Craton[J]. *Lithos*, 149: 51-60.
- Zhu R X, Zhang H F, Zhu G, Meng Q R, Fan H R, Yang J H, Wu F Y, Zhang Z Y and Zheng T Y. 2017. Craton destruction and related resources[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 106(7): 2233-2257.
- 曹焱. 2012. 冀西灵寿县石湖金矿床的矿物地球化学及深部远景预测(博士学位论文)[D]. 导师: 毛景文. 北京: 中国地质大学. 169页.
- 陈伟军, 郝情情, 蒋鑫, 覃锋, 褚少雄. 2015. 内蒙古鸡冠山钼矿流纹斑岩的成岩年龄及地质意义[J]. *地质与勘探*, 51(6): 1107-1113.
- 陈衍景, 张成, 李诺, 杨永飞, 邓軻. 2012. 中国东北钼矿床地质[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(5): 1223-1268.
- 成欢. 2012. 河北涞源大湾钼矿成矿类型特征及找矿标志(硕士学位论文)[D]. 导师: 刘建朝. 西安: 长安大学. 88页.
- 丁海洋. 2014. 太行山北段大湾钼矿地球化学特征、成矿流体及物质来源分析(硕士学位论文)[D]. 导师: 胡建中. 北京: 中国地质大学. 53页.
- 杜安道, 何红寥, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 68(4): 339-347.
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚. 2009. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. *岩矿测试*, 28(3): 288-304.
- 河北省地质工程勘查院. 2010. 河北省涞源县大湾钼矿资源利用现状核查报告[R].
- 河北省地质工程勘查院. 2018. 太行山中北段斑岩型矿床找矿靶区优选成果报告[R].
- 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 刘兰笙, 孙亚莉, 邹晓秋. 1996. 华北地台钼(铜)矿床成矿年代学研究: 辉钼矿铼-钨年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 15(4): 365-373.
- 黄水文. 2014. 太行山北段大湾斑岩型钼矿床岩浆岩与成矿关系研究(硕士学位论文)[D]. 导师: 刘建朝. 西安: 长安大学. 61页.
- 江思宏, 聂凤军, 赵省民. 2000. 铼-钨同位素体系介绍及其在矿床学研究中的应用[J]. *内蒙古地质*, (2): 45-50.
- 李超, 杜安道, 屈文俊. 2009. 大颗粒辉钼矿 Re-Os 同位素失耦现象及 ^{187}Os 迁移模式研究[J]. *矿床地质*, 28(5): 707-712.
- 李超, 屈文俊, 周利敏, 杜安道. 2010. Carius管直接蒸馏快速分离铼方法研究[J]. *岩矿测试*, 29(1): 14-16.
- 李瑞玲, 段超, 陈志宽, 李伟, 张志远. 2016. 太行山北段赤瓦屋铜钼矿化区花岗岩岩石的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *中国地质*, 43(5): 1761-1770.
- 李书领, 李永军, 吴乐, 王祚鹏, 汪振宇, 张郁玲. 2017. 新疆西天山可克萨拉铁铜矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义[J]. *西北地质*, 50(4): 81-90.
- 李文昌, 余海军, 尹光侯, 曹晓民, 黄定柱, 董涛. 2012. 滇西北铜厂沟钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿环境[J]. *矿床地质*, 31(2): 282-292.
- 马国玺. 1995. 河北涞源大湾钼矿床地质特征[J]. *华北地质矿产杂志*, 10(1): 64-76.
- 马金虎, 韩志宏, 席立永, 葛子凡. 2011. 涞源县龙门钼矿地质特征及勘查方向[J]. *河北地质*, (4): 22-23.
- 马晓辉, 马金虎. 2014. 大湾顶垂体构造控制下的成矿模式及找矿方向[J]. *河北地质*, (4): 13-16.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 21(1): 169-188.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定

附中文参考文献

蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山, 王晓芳, 邵宏翔, 储著银. 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨[J]. *岩石学报*, 19(1): 81-92.

- 定辉钼矿铼-钼地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254-262.
- 曲凯. 2012. 太行山北段木吉村斑岩铜(钼)矿床地质特征与成矿作用(硕士学位论文)[D]. 导师: 董国臣. 北京: 中国地质大学. 70页.
- 申志超, 侯增谦, 于枫, 陈志宽, 李秋耘, 马国玺, 葛峰, 王志敏. 2015. 太行山北段王安镇杂岩体中酸性岩铅石 SHRIMP U-Pb 定年、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报, 31(5): 1409-1420.
- 沈光银, 薛清波. 2011. 涿源火山盆地燕山期次流纹斑岩地质地球化学特征[J]. 矿产与地质, 25(5): 412-416+435.
- 涂勘. 1986. 河北涞源大湾钼矿床的蚀变矿化研究[J]. 矿床地质, 5(4): 49-61.
- 王婧. 2017. 承德县磴上钼硫矿床地质特征及成因探讨[J]. 世界有色金属, (8): 60+62.
- 王理瑞. 2012. 河北省涞水县安妥岭钼矿床地质与地球化学特征研究(硕士学位论文)[D]. 导师: 赵国春. 北京: 中国地质大学. 107页.
- 王丽红. 2016. 河北涞源鸽子岭铁矿床特征与成因(硕士学位论文)[D]. 导师: 杜杨松, 李顺庭. 北京: 中国地质大学. 51页.
- 王霞. 2012. 太行山北段中生代岩浆作用与成矿(硕士学位论文)[D]. 导师: 董国臣. 北京: 中国地质大学. 80页.
- 王亚民. 2016. 河北省柴家沟钼矿地质特征与找矿标志研究[J]. 世界有色金属, (18): 108+111.
- 魏绮英, 涂勘. 1987. 河北大湾钼矿中硫锰矿与闪锌矿的成因关系[J]. 矿物学报, 7(1): 74-77.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 郑建平. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145-1174.
- 徐义刚. 2006. 太行山重力梯度带的形成与华北岩石圈减薄的时空差异性有关[J]. 地球科学, 31(1): 14-22.
- 喻学惠, 任建业, 张俊霞. 1996. 太行山中段铜-金成矿条件及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社. 1-120.
- 翟明国, 刘文军, 杨进辉. 2001. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用[J]. 中国科学(D辑), 31(7): 545-552.
- 张德诚, 韩秀丽, 张韩, 李志民, 刘磊, 潘苗苗, 张龙飞. 2013. 河北涞源大湾钼矿床成矿地质条件[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 35(3): 85-88.
- 张立敏. 2013. 涞源大湾钼矿床地质特征及外围找矿方向[J]. 西部探矿工程, 25(11): 111-114.
- 张苏楠. 2014. 太行山王安镇杂岩体地球化学特征及成因探讨(硕士学位论文)[D]. 导师: 刘建朝. 西安: 长安大学. 73页.
- 者萌, 胡建中, 周伟, 丁海洋. 2014. 河北省安妥岭钼矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J]. 现代地质, 28(2): 339-347.