

内蒙古维拉斯托斑岩型锡矿床成岩、成矿时代及其地质意义*

翟德高^{1,2}, 刘家军^{1,2}, 李俊明¹, 张梅³, 李泊洋⁴, 付旭⁴,
蒋胡灿⁵, 马立军⁵, 漆亮⁶

(1 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 4 内蒙古地质勘查有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020; 5 内蒙古维拉斯托矿业有限责任公司, 内蒙古 赤峰 025350; 6 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要 维拉斯托 Sn 矿床为内蒙古中南段地区新发现的大型斑岩型矿床, 矿床的形成与石英斑岩有密切的成因联系。该斑岩型 Sn 矿床的发现与该区已发现的维拉斯托和拜仁达坝大型脉状 Cu-Pb-Zn-Ag 多金属矿床可能属于同一岩浆-热液成矿体系。虽然前人已对热液脉状 Zn-Cu 矿床和 Ag-Pb-Zn 矿床有了较多研究, 但对新发现的斑岩型锡矿床开展的研究还十分欠缺。文章首次报道了新发现斑岩型矿床的成岩和成矿年龄。利用 LA-ICP-MS 方法对石英斑岩中的锆石进行 U-Pb 同位素定年, 获得的年龄为 (135.7 ± 0.9) Ma (MSWD = 1.4, $n = 24$) 表明石英斑岩的侵位时代为早白垩世。对与 Sn 矿化密切相关的辉钼矿进行了 Re-Os 同位素定年, 结果显示辉钼矿的 Re-Os 同位素等时线年龄为 (125.7 ± 3.8) Ma (MSWD = 1.7, $n = 4$), 可代表斑岩型矿床中 Sn 发生矿化的时间。本次获得的年代学数据表明, 该斑岩型矿床成矿年龄稍晚于成岩年龄, 与国内外众多典型斑岩型矿床具有类似特征。新发现的维拉斯托斑岩型 Sn 矿床形成于燕山晚期, 与该区众多岩浆-热液多金属矿床的形成时代一致, 推测矿床的成岩、成矿过程很可能与中生代岩石圈的伸展构造有关。

关键词 地球化学; 斑岩型 Sn 矿床; 锆石 U-Pb; 辉钼矿 Re-Os; 维拉斯托; 内蒙古
中图分类号: P618.44 文献标志码: A

Geochronological study of Weilasituo porphyry type Sn deposit in Inner Mongolia and its geological significance

ZHAI DeGao^{1,2}, LIU JiaJun^{1,2}, LI JunMing¹, ZHANG Mei³, LI BoYang⁴, FU Xu⁴, JIANG HuCan⁵,
MA LiJun⁵ and QI Liang⁶

(1 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 4 Inner Mongolia Geological Exploration Co., Ltd., Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 5 Weilasituo Mining Co., Ltd., Chifeng 025350, Inner Mongolia, China; 6 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract

The Weilasituo Sn deposit, which is genetically related to a quartz porphyry intrusion, is a large-sized porphyry-

* 本文受到中国地质调查局整装勘查项目(编号: 12120114077001)、内蒙古自治区院土项目(编号: 2014_01_YS01)和高等学校科技创新引智计划(编号: B07011)的联合资助

第一作者简介 翟德高,男,1985年生,副教授,硕士生导师,主要从事矿床学和矿床地球化学方面的研究与教学工作。Email: dgzhai@cugb.edu.cn

收稿日期 2015_08_19; 改回日期 2016_07_16。张绮玲编辑。

ry type deposit discovered in the southern segment of the Da Hinggan Mountains. This deposit, together with the previously discovered Weilasituo Cu-Zn and Bairendaba Ag-Pb-Zn vein deposits in this region, is possibly dominated by one magmatic-hydrothermal system. No detailed research has been conducted to understand this newly-discovered Sn deposit, although numerous studies have been carried out about the local vein type Zn-Cu and Ag-Pb-Zn mineralization. In this study, the authors firstly report the geochronological data of porphyry intrusion and Sn mineralization in Weilasituo. Based on zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results, the authors obtained an age of (135.7 ± 0.9) Ma (MSWD = 1.4, $n = 24$), indicating that the intrusion of the quartz porphyry took place in the Early Cretaceous. Molybdenite, which shows a close relationship with Sn mineralization, has a Re-Os age of (125.7 ± 3.8) Ma (MSWD = 1.7, $n = 4$). The obtained geochronological data of magmatism and mineralization indicate that Sn mineralization was relatively later than porphyry intrusion, comparable with the reported age data from porphyry type deposits in the world. This newly-discovered Weilasituo porphyry type Sn deposit formed in the late Yanshanian period, coincident with the formation time of numerous magmatic-hydrothermal deposits in this region, implying that the local magmatism and its related mineralization were possibly associated with Mesozoic lithospheric extension.

Key words: geochemistry, porphyry type Sn deposit, zircon U-Pb, molybdenite Re-Os, Weilasituo, Inner Mongolia

大兴安岭地区是中国北方重要的银、铅、锌、铜、锡、铁、铜等多金属矿集区,已发现有维拉斯托 Zn-Cu 矿床、拜仁达坝 Pb-Zn-Ag 矿床、双尖子山 Ag 多金属矿床、黄岗梁 Fe-Sn 矿床、大井 Cu-Sn 矿床、白音诺尔 Pb-Zn 矿床、边家大院 Ag-Pb-Zn 矿床等大型超大型矿床(赵一鸣等,1997;刘建明等,2004;刘家军等,2010;翟德高等,2012;匡永生等,2014;王喜龙等,2014)。其中维拉斯托 Zn-Cu 矿床和拜仁达坝 Pb-Zn-Ag 矿床被认为可能受到统一的岩浆-热液事件控制,两者在成因上具有紧密的联系(刘翼飞等,2014)。虽然前人对这两个矿床分别在矿相学(刘妍等,2011)、流体包裹体(梅微等,2015)、稳定同位素(江思宏等,2010)、岩石地球化学(黄丁伶等,2014)、岩石年代学(王新宇等,2013)及成矿体系(刘翼飞等,2014)等方面有较多的探讨,但对成矿年代没有很好地限定。一方面由于缺乏直接的证据表明热液脉状 Zn-Cu 和 Pb-Zn-Ag 矿床与某一期岩浆活动关系紧密;另一方面针对热液脉状矿床没有较为理想的矿物用于精确的成矿年代学限定。维拉斯托 Sn 矿床于 2014 年在该区 Zn-Cu 矿体附近被发现。随着对该区勘查工作的深入,矿床规模已达到大型,且深部还发现了同锡矿化密切相关的石英斑岩体,这为进一步提升该区成矿理论认识提供了很好素材。本次研究首次对与维拉斯托锡矿床成矿关系紧密的石英斑岩进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学测试,同时对矿床中与锡矿化共生的辉钼矿进行 Re-Os 同位素年龄分析。精确的年代学分析对于提

高该区成岩、成矿事件发生的动力学背景及区域成矿作用认识等方面均有所裨益。

1 区域地质背景

维拉斯托 Sn 矿床位于大兴安岭中南段铅-锌-银-铜-锡多金属成矿带内。本区大地构造位置归属于大兴安岭南段晚古生代增生造山带,其南、北边界分别为西拉木伦河断裂和二连-贺根山断裂,东以嫩江断裂为界(周振华等,2010a)。

区域内的构造组成主要为背斜及次级的挤压构造和断裂。其中断裂以北东向断裂为主,北西向及近东西向断裂也较为发育,构成了该区近网格状的构造格局(图 1)。区域内出露的地层主要有古元古界黑云母斜长片麻岩,也被称之为锡林浩特杂岩;石炭系海相碎屑岩和碳酸盐岩;二叠系大石寨组砂岩和林西组粉砂质板岩、泥岩;侏罗系万宝组泥岩和满克头鄂博组流纹岩;第四系覆盖(图 1)。区内侵入岩主要为石炭纪石英闪长岩和燕山期花岗岩类,其中石英闪长岩受到区域变质作用的影响呈现轻微片麻理构造,具有弧岩浆活动的特点(刘翼飞等,2010)。燕山期花岗岩根据矿物组成及颜色的差异可划分出多期。

2 矿床地质

2.1 矿区地质特征

维拉斯托大型锡多金属矿床矿体主要呈脉状产

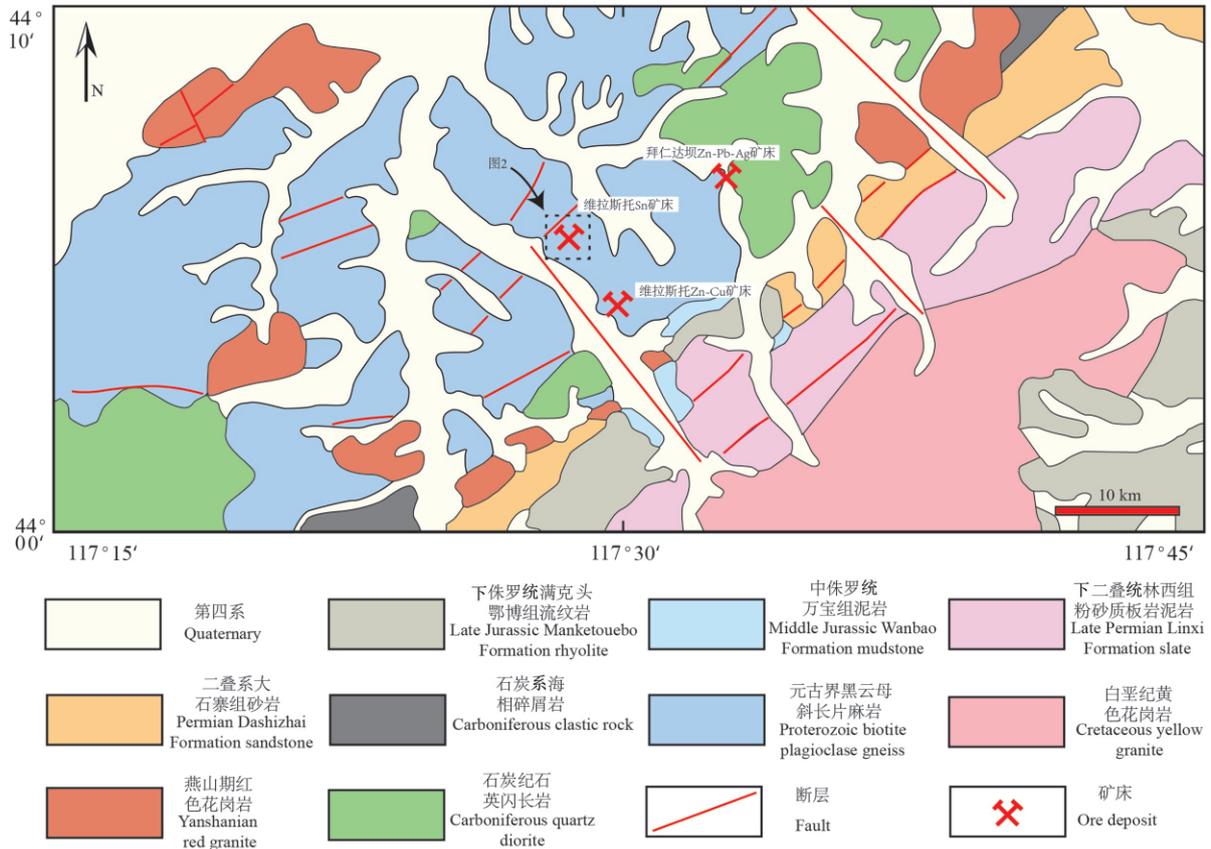


图 1 维拉斯托和拜仁达坝矿区地质图(底图根据刘翼飞等 2014; Ouyang et al., 2014 修改)

Fig. 1 Geological map of the Weilasituo and Bairendaba deposits (modified after Liu et al., 2014; Ouyang et al., 2014)

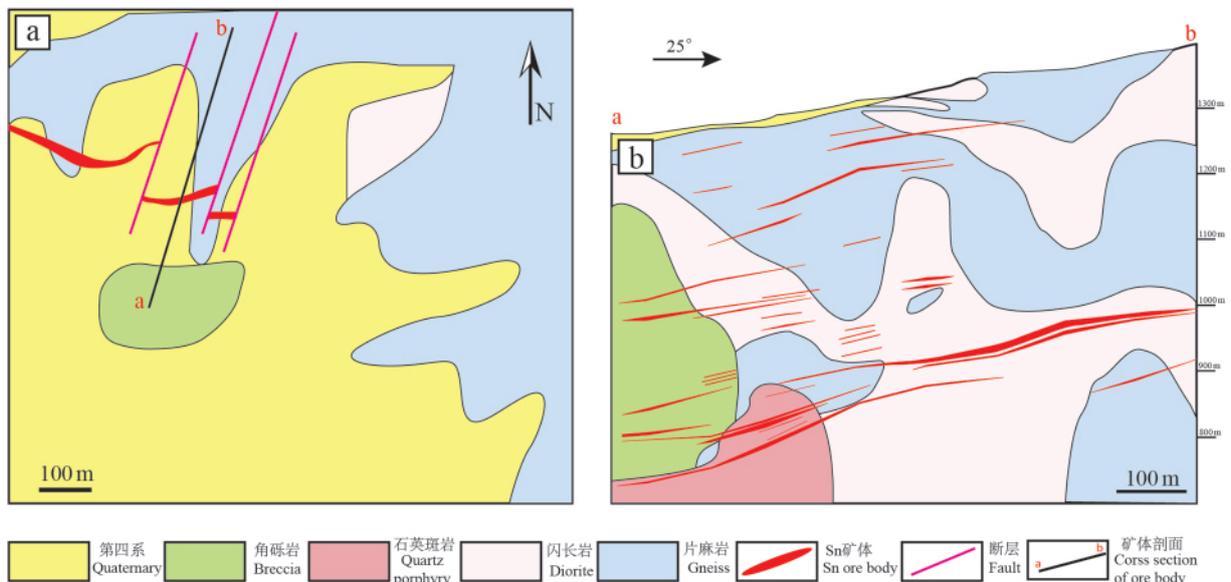


图 2 维拉斯托 Sn 矿床地质简图(a)和剖面图(b) (底图根据刘翼飞等 2014 修改)

Fig. 2 Geological map (a) and cross_section (b) of the Weilasituo Sn deposit (modified after Liu et al., 2014)

出,空间上与石英斑岩关系紧密。赋矿围岩主要为黑云斜长片麻岩即锡林浩特杂岩及侵入于杂岩体中

的石英闪长岩(图 2)。

杂岩体的岩性主要为角闪岩相的黑云母斜长片

麻岩,主要由斜长石(50%±)、石英(25%~30%)、黑云母(20%~25%)和角闪石(2%~3%)组成。该层位厚度大于917 m,为脉状矿体主要的赋存层位之一。石英闪长岩呈岩株状侵入到黑云斜长片麻岩中,使片麻岩呈残留顶盖或捕虏体形式残留(图2)。岩石主要矿物由斜长石(55%~65%)、石英(15%~20%)、黑云母(10%~15%)组成,次要矿物为普通角闪石(3%~7%)。石英闪长岩中锆石的 SHRIMP U-Pb 测年结果为(326.5±1.6) Ma(刘翼飞等,2010)。石英斑岩主要呈岩株状侵入到黑云斜长片麻岩和石英闪长岩之中(图2b),斑岩体出现于地表

400 m 以下。斑晶为半自形至他形石英,基质已完全蚀变为钠长石和天河石。矿区内脉岩较少,主要有石英闪长岩脉呈北西向分布于黑云斜长片麻岩中。

矿区地表可见花岗斑岩侵入到黑云斜长片麻岩之中(图3a),该斑岩体规模、界线尚未确定,可能为石英斑岩的边缘相,也可能为晚期的岩脉或岩墙侵入。在该花岗斑岩体中还发育石英脉(图3c)。

2.2 矿体特征

维拉斯托脉状锡多金属矿床矿体产出在垂向深度上有一定的变化规律。深部矿化以锡为主,伴生

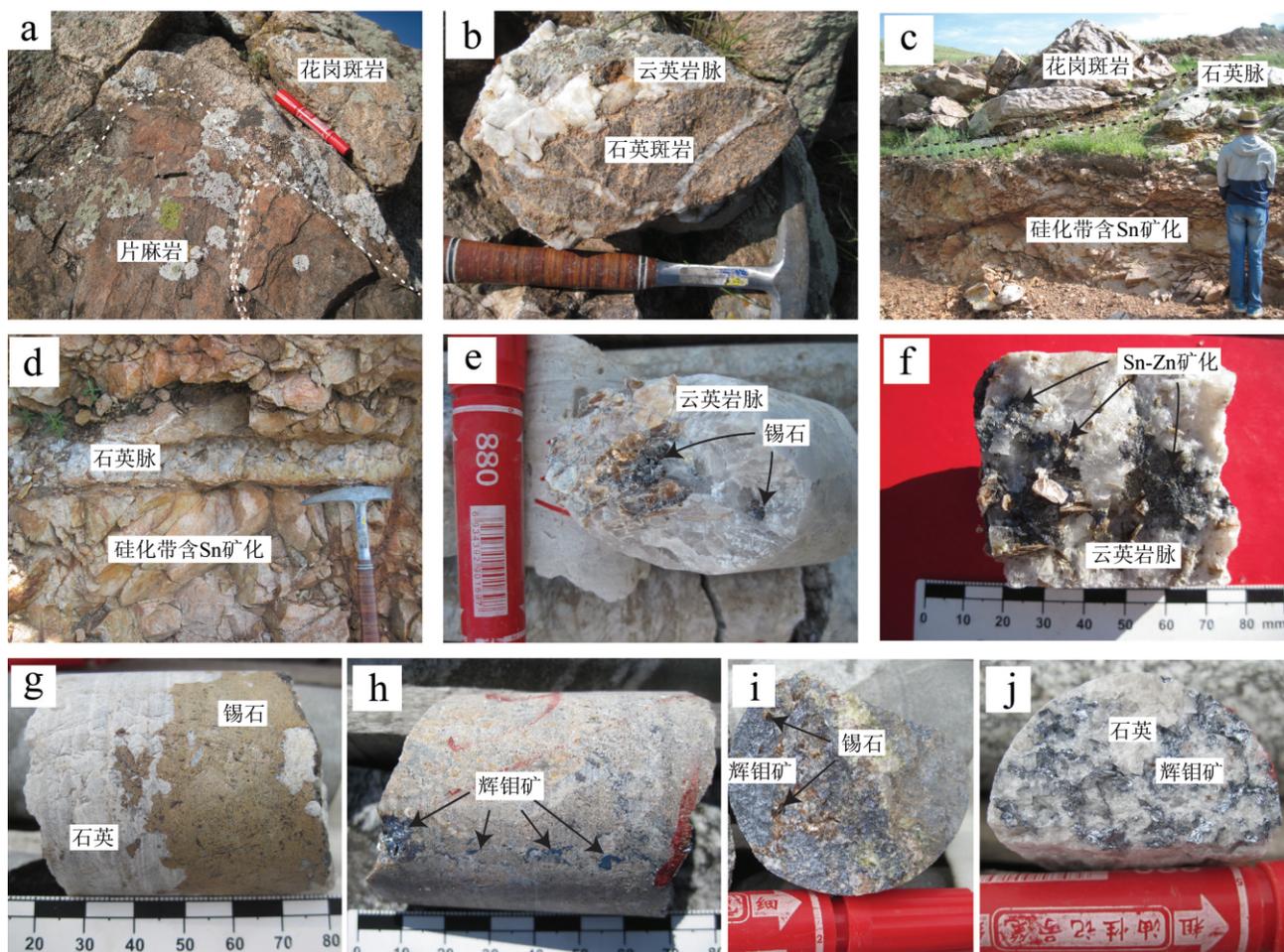


图3 维拉斯托 Sn 矿床岩石和矿产产出特征

a. 花岗斑岩与片麻岩的侵入接触关系; b. 地表角砾岩,角砾由石英斑岩组成,胶结成分为云英岩脉; c. 地表的硅化带含锡矿化,上覆石英脉和花岗斑岩; d. 地表硅化带中含锡矿化,且硅化带中有石英脉产出; e. 锡石与强云英岩化脉共生产出; f. Sn-Zn 矿化与云英岩脉共生产出; g. 锡石产于石英脉中; h. 辉钼矿产于强云英岩化脉中; i. 辉钼矿与锡石共生产于强云英岩化脉中; j. 辉钼矿产于石英脉中

Fig. 3 Occurrences of igneous rocks and mineralization in the Weilasituo Sn deposit

a. Quartz porphyry that intruded into gneiss; b. Breccias from shallow ground; c. Silicification zone with Sn mineralization from shallow ground; d. Sn mineralization intruded by quartz vein from shallow ground; e. Cassiterite associated with greisens; f. Sn-Zn mineralization with greisens; g. Cassiterite in quartz vein; h. Molybdenite in greisen vein; i. Molybdenite coexistent with cassiterite in greisens; j. Molybdenite coexistent with quartz

Zn、Pb、Nb、Ta 等元素,矿化与强云英岩、钠长石、天河石化的石英斑岩有关。中部矿化以锡为主,伴生 Cu、Zn 等成矿元素,与隐爆角砾岩有关。其中隐爆角砾岩主要呈岩筒状分布于地表以下 0~600 m 之间,地表出露范围约 200 m×300 m(图 2)。角砾成分主要由片麻岩、石英闪长岩以及石英斑岩组成,胶结物主要为云英岩化脉和石英脉(图 3b)。浅部矿化为包含 Sn、W、Cu、Zn、Mo 等成矿元素的石英大脉型矿体,也含石英网脉状矿化。地表石英脉可穿插花岗岩斑(图 3c)和强硅化的锡矿化带(图 3d)。浅部石英脉型矿体主要赋存于北东向的压扭性断裂中。上述 3 种不同类型的矿体在空间上由深至浅依次产出,与深部的石英斑岩体有十分密切的关系,为找矿勘探提供了线索。

矿体主要为连续的脉状或大脉状,总体形态较简单,走向基本连续,在倾向上有分支复合现象。根据化学分析圈定出 248 条矿体,其中含锡矿体(化) 178 条,钼矿体(化) 46 条,锌矿体(化) 21 条,以及铜矿体(化) 3 条。其中达到工业品位的矿体有 76 条,锡的储量大于 2.8 万 t,达到大型规模,锡的平均品位为 0.9%。各矿体规模大小中以 SnO 号矿体为主,其资源量占总资源量的 50% 左右。矿体一般延长数十米至 1400 m,厚度一般为 0.1 m 至十几米。

矿体的围岩蚀变主要以强云英岩化和硅化为主,其中地表可见强硅化蚀变带(图 3c、d),该带内含有锡矿化。深部矿体主要与强云英岩化关系密切,绝大多数锡矿体呈云英岩化脉的形式产出(图 3e、f)。部分深部矿体也与强硅化有关,如锡矿化(图 3g)和钼矿化(图 3j)与石英脉有关。此外,矿体不同深度还发育绢云母化、绿帘石化、绿泥石化以及高岭土化和叶腊石化等蚀变。

金属矿物主要有锡石(图 3e)、黝锡矿、闪锌矿(图 3f)、辉钼矿(图 3h~j),以及少量的方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、毒砂及黝铜矿等。非金属矿物主要有石英、白云母、黄玉、萤石、绢云母、绿泥石等。矿石结构主要有半自形晶粒状结构、半自形片状结构、他形晶粒状结构等;矿石构造主要有块状、浸染状、细脉状和条带状构造等。

3 样品采集与测试方法

石英斑岩样品采自钻探岩芯,样品标高在 500 m 之下。岩石样品较为新鲜,石英斑晶发育,部分样品

具有天河石化及云英岩化。该斑岩体与矿区锡、钨、锌、钼等矿化密切相关。辉钼矿样品采自岩芯,包括含矿云英岩化脉(图 3h、i)和石英脉(图 3j),部分辉钼矿来自矿体围岩黑云斜长片麻岩中。在一些含矿云英岩化脉中,辉钼矿与锡矿化密切共生(图 3i),表明钼与锡成矿关系较为紧密。因此,可通过测定辉钼矿的年龄推测该区锡矿化的时间。

将采集的石英斑岩样品人工破碎后,按常规用重力和磁选方法分选出锆石,然后在双目镜下挑选锆石。将选出的纯净锆石颗粒和标样一同置于环氧树脂制成靶,然后用于透射光、反射光及阴极发光研究。锆石 LA_ICP_MS 测试分析在中国地质大学(北京)科学研究院 LA_ICP_MS 实验室完成。分析使用的激光器型号为美国 New Wave 公司 UP193SS 型激光器,激光波长为 193 nm。束斑直径为 36 μm,激光频率为 10 Hz;预剥蚀时间和剥蚀时间分别为 5 s 和 45 s。实验过程使用 He 作为载气,流速为 0.8 L/min。等离子质谱(ICP_MS)型号为美国 Agilent 公司生产的 7500a 型质谱仪;元素积分时间:U、Th、Pb 为 20 ms, Si、Zr 为 6 ms,其他元素为 10 ms。数据处理软件使用 Glitter 4.4.1。年龄计算时以标准锆石 TEM 为外标进行同位素比值校正,标准锆石 91500 和 Qinghu 为监控盲样。元素含量以国际标样 NIST610 为外标, Si 为内标计算, NIST612 和 NIST614 做监控盲样,²⁰⁴Pb 校正方法同 Andersen(2002)的方法。

辉钼矿样品的 Re_Os 同位素分析在中国科学院地球化学研究所 Re_Os 同位素实验室完成。化学分离、ICP_MS 测定和数据处理按照 Re_Os 同位素测试的实验流程与标准执行(漆亮等,2006),简述如下:准确称取待分析样品,通过细颈漏斗加入到 Carius 管底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,使成粘稠状(-50~-80℃)。放装好样品的 Carius 管到该保温杯中。用适量超纯浓 HCl 通过细颈漏斗把准确称取的¹⁸⁵Re 和¹⁹⁰Os 混合稀释剂转入 Carius 管底部。再依次加入适量硝酸和 30% H₂O₂。当 Carius 管底溶液冻实后,用液化石油气和氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分。擦净表面残存的乙醇,放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 200℃,保温 24 h。取出冷却后,在底部冻实的情况下,使用 40 mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。蒸馏分离 Os 的过程如下,把内装 5 mL 超纯水的 25 mL 比色管放在冰水浴中,以备吸收

蒸馏出的 OsO_4 。连接蒸馏装置,加热煮沸 30 min。所得 OsO_4 水吸收液可直接用于 ICP_MS 测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液转入 150 mL Teflon 烧杯中待分离铼。萃取分离 Re 的过程如下,将蒸馏残液置于电热板上加热近干,加少量水加热近干,重复两次以降低酸度。加入 10 mL 5 ~ 6 mol/L NaOH,稍微加热,促进样品转为碱性介质。转入 Teflon 离心管中,加入 4 ~ 10 mL 丙酮,振荡 1 min 萃取 Re。在电热板上用 50℃ 加热除去丙酮,然后电热板温度升至 120℃ 加热至干,加数滴浓硝酸和 30% 过氧化氢,加热蒸干以除去残存的 Os。用数滴 HNO_3 溶解残渣,用水转移到小瓶中,稀释到适当体积,备 ICP_MS 测定 Re 同位素比值。质谱测定采用美国 TJA 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪 TJA X_series ICP_MS 测定同位素比值。对于 Re,选择质量数 185、187,用 190 监测 Os;对于 Os,选择质量数为 186、187、188、189、190、192,用 185 监测 Re。

4 分析结果

原位微区微量元素分析表明锆石中 Th、U 和 Pb 的含量变化较大,分别为 $713.2 \times 10^{-6} \sim 23150.8 \times 10^{-6}$ 、 $10251.5 \times 10^{-6} \sim 48147.2 \times 10^{-6}$ 和 $209.8 \times 10^{-6} \sim 1043.0 \times 10^{-6}$ (表 1)。所分析锆石的 Th/U 比值变化范围为 0.07 ~ 0.48 (均值为 0.19),只有 2 个值低于 0.1,其余所有数据均大于 0.1 (表 1),表明所分析锆石属于典型的岩浆成因锆石 (Belousova et al., 1998)。花岗岩 24 颗锆石的 LA_ICP_MS U_Pb 分析结果表明锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(132 \pm 2) \text{ Ma}$ ~ $(139 \pm 2) \text{ Ma}$,加权平均年龄为 $(135.7 \pm 0.9) \text{ Ma}$

(MSWD = 1.4, $n = 24$) (图 4)。在 U_Pb 年龄谐和图上,所有数据点均在谐和线附近,显示较好的谐和性。造成所测数据没有落在谐和线上的原因可能是由于所采的石英斑岩大部分受到较强的云英岩化和天河石化蚀变,可能会造成 U_Pb 体系中少量 U 或 Pb 同位素的丢失或加入。但根据获得的年龄结果,单个锆石的年龄数据基本一致 (图 4),表明测试结果可代表石英斑岩的真实结晶年龄。

为获得矿床锡矿化的成矿时代,对矿床中与锡矿化密切共生的辉钼矿进行了 Re_Os 同位素定年,定年结果列于表 2。获得辉钼矿 Re_Os 同位素的模式年龄为 $(121.1 \pm 2.2) \text{ Ma}$ ~ $(127.7 \pm 1.8) \text{ Ma}$,加权平均年龄为 $(125.2 \pm 1.9) \text{ Ma}$ (图 5a)。获得辉钼矿 Re_Os 等时线年龄为 $(125.7 \pm 3.8) \text{ Ma}$ (图 5b),初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 -0.0012 ± 0.0042 。

5 讨论

5.1 成岩、成矿时代

前人对维拉斯托和拜仁达坝地区产出的众多花岗岩类获得的 SHRIMP U_Pb 年龄为 $(298.0 \pm 2.5) \text{ Ma}$ ~ $(320.5 \pm 4.1) \text{ Ma}$ (王新宇等, 2013),与该区出露的闪长岩体中锆石 SHRIMP U_Pb 年龄 $(326.5 \pm 1.6) \text{ Ma}$ 类似 (刘翼飞等, 2010)。上述岩体形成时代均早于本次新获得的石英斑岩的年龄 $(135.7 \pm 0.9) \text{ Ma}$,这与野外地质穿插关系一致,即石英斑岩侵入到早先形成的岩体中。通过本次的年代学研究,也进一步证实本区与锡多金属矿化关系紧密的岩体为燕山晚期的石英斑岩,与其他早期的岩体关系不大。

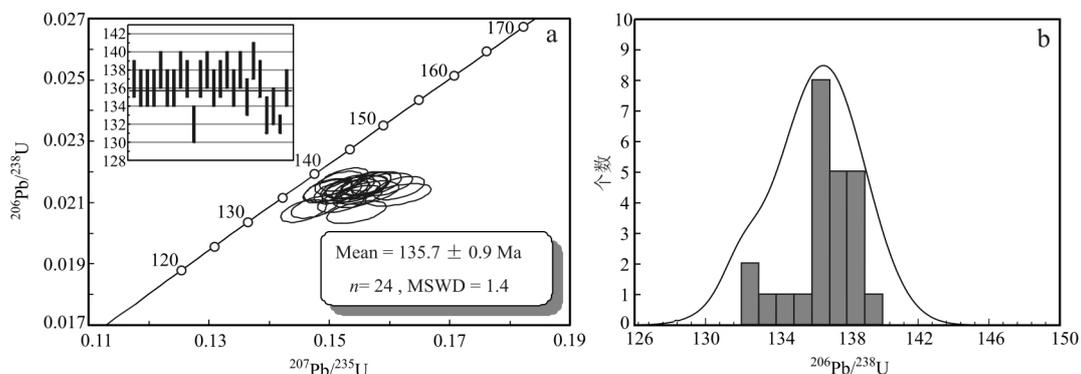


图 4 维拉斯托 Sn 矿床石英斑岩中锆石 U_Pb 年龄谐和图 (a) 和年龄分布直方图 (b)

Fig. 4 Concordia diagram (a) and histogram (b) of zircon U_Pb age of the quartz porphyry from the Weilasituo Sn deposit

表 1 维拉斯托锡矿床石英斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from quartz porphyry in the Weilasituo Sn deposit

测点号	$w(B)/10^{-6}$				Th/U	同位素比值				年龄/Ma					
	Th	U	Pb			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
WL1-01	7398.6	41925.4	889.8		0.18	0.0089	0.00265	0.02149	0.00025	309	19	147	2	137	2
WL1-02	3249.2	24105.9	503.1		0.13	0.0089	0.00265	0.02139	0.00025	301	20	146	2	136	2
WL1-03	7525.4	43338.8	914.2		0.17	0.0089	0.00263	0.02139	0.00025	300	19	146	2	136	2
WL1-04	4688.1	32304.3	672.4		0.15	0.0088	0.00260	0.02134	0.00025	261	20	143	2	136	2
WL1-05	9675.6	43976.1	947.3		0.22	0.0089	0.00267	0.02163	0.00025	301	20	147	2	138	2
WL1-06	713.2	10261.5	209.8		0.07	0.0089	0.00264	0.02140	0.00025	230	21	142	2	136	2
WL1-07	11433.7	47860.8	1029.2		0.24	0.00138	0.00361	0.02125	0.00024	417	57	152	3	136	2
WL1-08	5796.2	36882.6	792.8		0.16	0.00128	0.00335	0.02158	0.00025	343	56	150	3	138	2
WL1-10	4459.5	26619.3	560.1		0.17	0.0089	0.00265	0.02151	0.00025	274	20	145	2	137	2
WL1-11	23150.8	47903.7	1043.0		0.48	0.00087	0.00250	0.02072	0.00024	241	20	138	2	132	2
WL1-13	9739.8	46264.5	984.9		0.21	0.00088	0.00262	0.02144	0.00025	267	20	144	2	137	2
WL1-14	1160.2	12902.4	268.0		0.09	0.00092	0.00274	0.02160	0.00025	303	20	147	2	138	2
WL1-15	9038.2	41472.3	888.0		0.22	0.00135	0.00352	0.02132	0.00025	336	59	147	3	136	2
WL1-16	9007.8	45423.7	975.2		0.20	0.00130	0.00340	0.02150	0.00025	290	58	146	3	137	2
WL1-17	5469.7	34304.7	725.8		0.16	0.00087	0.00262	0.02164	0.00025	232	20	143	2	138	2
WL1-18	10051.7	47454.6	1005.2		0.21	0.00089	0.00263	0.02135	0.00025	281	20	144	2	136	2
WL1-19	10234.4	43523.2	939.9		0.24	0.00090	0.00272	0.02163	0.00025	325	20	149	2	138	2
WL1-22	9783.8	44889.5	946.1		0.22	0.00091	0.00267	0.02120	0.00024	326	20	146	2	135	2
WL1-23	5945.1	29873.8	640.7		0.20	0.00088	0.00265	0.02175	0.00025	233	20	144	2	139	2
WL1-24	6833.9	35284.7	748.8		0.19	0.00094	0.00281	0.02147	0.00025	394	20	152	2	137	2
WL1-25	11845.4	48147.2	1003.1		0.25	0.00088	0.00256	0.02085	0.00024	255	20	140	2	133	2
WL1-26	7755.9	42506.0	879.2		0.18	0.00090	0.00264	0.02104	0.00024	303	20	144	2	134	2
WL1-28	2123.8	18100.6	369.5		0.12	0.00129	0.00324	0.02069	0.00024	378	55	146	3	132	1
WL1-29	2098.6	15932.0	326.8		0.13	0.00089	0.00264	0.02137	0.00025	231	21	142	2	136	2

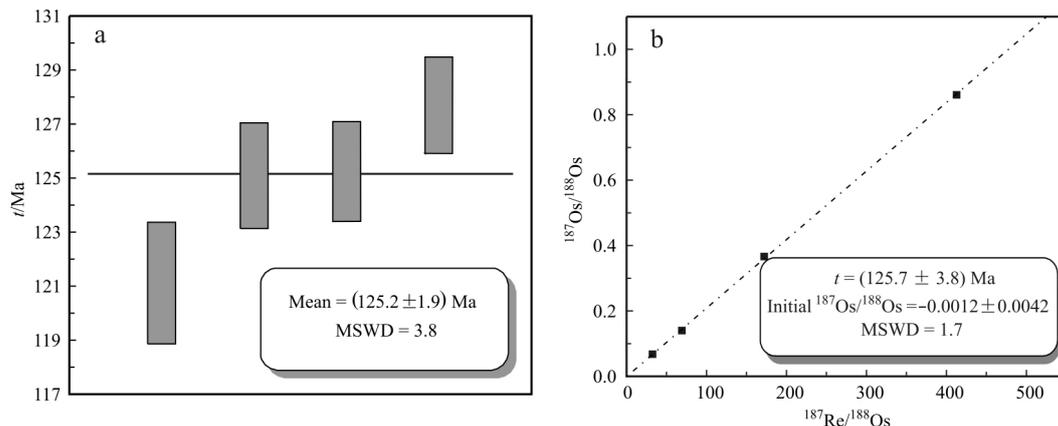


图5 维拉斯托 Sn 矿床辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄 (a) 和等时线年龄 (b)

Fig. 5 Weighted average Re-Os model age (a) and Re-Os isochron age (b) of molybdenite from the Weilasituo Sn deposit

表2 维拉斯托锡矿床辉钼矿 Re-Os 同位素组成

Table 2 Re-Os isotopic data of molybdenites from the Weilasituo Sn deposit

样品编号	采样位置	$w(\text{Re}) / (\text{ng/g})$	1σ	$w(\text{普通Os}) / (\text{ng/g})$	1σ	$w(^{187}\text{Re}) / (\text{ng/g})$	1σ	$w(^{187}\text{Os}) / (\text{ng/g})$	1σ	模式年龄	1σ
14WL_13	zk0310, 270 m	110.6	1.0	0.087	0.004	69.2	0.7	0.140	0.003	121.1	2.2
14WL_18	zk2802, 391 m	659.0	8.0	0.267	0.020	413.0	5.0	0.861	0.013	125.1	1.9
14WL_22	zk2802, 361 m	51.9	1.0	0.073	0.001	32.5	0.6	0.068	0.001	125.2	1.8
14WL_23	zk1504, 291 m	274.9	3.4	0.082	0.008	172.1	2.1	0.366	0.005	127.7	1.8

已有研究表明维拉斯托脉状锌-铜矿体中发育的白云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 (133.4 ± 0.8) Ma, 被认为是维拉斯托脉状锌-铜矿床晚期或最后一次成矿热液活动的时间(潘晓菲等, 2009), 该年龄与拜仁大坝东区银都矿床中白云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄 (135 ± 3) Ma基本一致(常勇等, 2010)。基于不同年龄测试方法误差影响的差异, 本次研究认为辉钼矿的封闭温度较高(约 430°C , McInnes et al., 2005), 受后期热液、变质和构造事件影响较小(Stein et al., 2001), 相对获得的年龄结果更为可靠。虽然白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄要稍早于辉钼矿年龄, 考虑到测试结果的误差影响, 确定维拉斯托矿区矿化时间应与辉钼矿的年龄一致。本次研究获得的石英斑岩年龄与辉钼矿的年龄在误差范围内差别不大(图4、5), 进一步表明维拉斯托锡多金属发生矿化的时间为早白垩世。

本次工作确定维拉斯托矿床的成矿年龄 (125.7 ± 3.8) Ma) 与大兴安岭中南段地区众多岩浆-热液矿床的形成时间基本一致(图6), 如拜仁大坝 Ag-Pb-Zn 矿床(135 Ma, 常勇等, 2010)、黄岗梁 Fe-Sn 矿床(139.9 Ma, 翟德高等, 2012)、大井 Cu-Sn 矿床(138.5 Ma, 毛景文等, 2005)、白音诺尔 Pb-Zn-

Ag 矿床(148 Ma, 张德全等, 1993)、喀什吐 Mo 矿床(147 Ma, Zhai et al., 2014)、边家大院 Ag-Pb-Zn 矿床(147 Ma, 未发表数据)、浩布高 Pb-Zn 矿床(131.2 Ma, 盛继福等, 1999)、太平沟 Mo 矿床(130.1 Ma, 翟德高等, 2009)等。对该区众多矿床成矿年龄进行对比可知, 该区燕山期成矿事件集中爆发的时间段约为120~140 Ma, 这已成为中国北方最为突出的一个成矿高峰期(毛景文等, 2003; 2005)。结合区域成矿规律, 可大致总结出该区总体的成矿特点为成矿时间跨度大(120~270 Ma)、短时间内集中爆发式成矿(120~140 Ma)、成矿元素多元化(Cu-Pb-Zn-Fe-Ag-Au-Mo-W-Sn-REE-U)、成矿多与中酸性岩浆活动有关、成矿系统较为完整(毛景文等, 2003; 2005)。

5.2 成岩、成矿动力学背景

多数学者认为大兴安岭地区区域构造演化主要包括两个大的阶段, 早阶段为晚古生代西伯利亚古板块与华北古板块碰撞隆升-裂隙-再碰撞的过程, 该过程形成了区域的基本构造格架; 晚阶段为中生代时期发生的强烈陆缘活化型构造-岩浆活动, 从而引发了大规模成矿事件(徐志刚等, 1993; 张永正等, 2007; 周振华等, 2010b)。兴安岭中南段地区地壳演

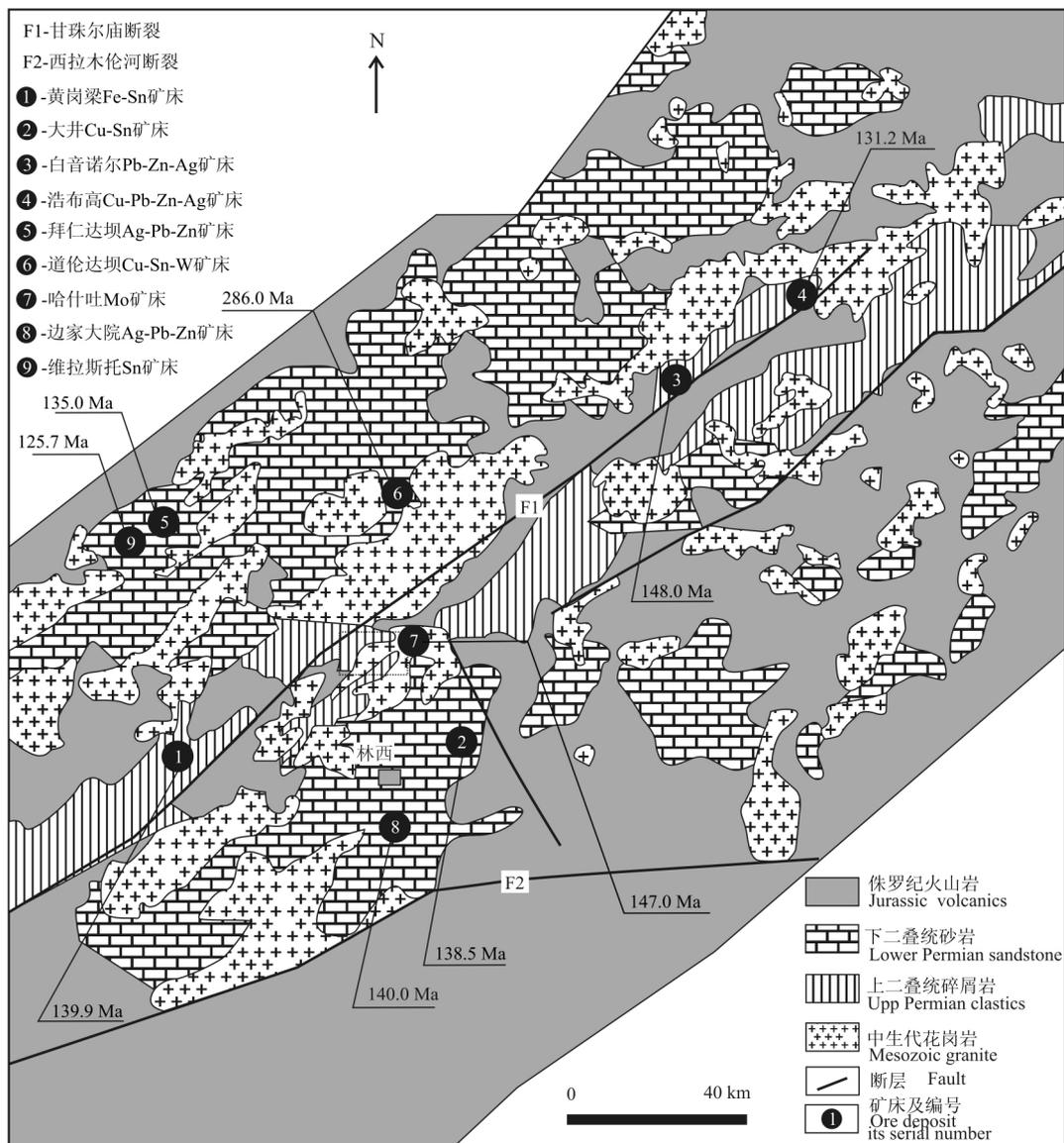


图 6 大兴安岭中南段地区地质简图及主要矿产分布图(底图根据 Zeng et al., 2009 略有修改)

Fig. 6 Geological map and deposit distribution of the southern segment of the Da Hinggan Mountains (base map modified after Zeng et al., 2009)

化在二叠纪末期,随着古亚洲洋沿着索伦缝合带的最后消失,华北克拉通与西伯利亚板块成为统一的整体,形成巨型中亚造山带(Xiao et al., 2004),从此之后进入了碰撞后地壳演化阶段。大兴安岭地区的主体构造单元格架和布局也逐渐形成(刘建明等, 2004),形成的火山_沉积地层构成了区域新的基底。

部分学者通过研究提出大兴安岭中南段地区在早白垩世时期(140~96 Ma),岩石圈发生大规模面型拆沉和减薄(邵济安等 2005)。这一过程可促使软流层上涌,使古老岩石圈地幔发生进一步肢解、变

形(邵济安等,1998)。该时期太平洋板块形成并向西俯冲,导致深部软流层继续发生上涌底侵。随后该区岩石圈进入全新的从挤压向伸展转变和巨大减薄阶段(肖庆辉等 2006)。这与前人提出的中国东部在中生代时期发生了成矿动力学背景的构造体质大转折这一结论一致(毛景文等,2003; 2005)。此外,在大兴安岭中南段地区先后发现早中生代的幔源镁铁质堆晶岩和侵入体、早_中侏罗世及早白垩世的基性岩墙群和早白垩世超基性角闪岩和碱性橄榄玄武岩,都被认为是大兴安岭晚中生代的花岗岩_火

山活动为伸展背景下岩浆演化的一个阶段(邵济安等,1999)。幔源岩石的发现进一步表明中生代早期大兴安岭地区岩石圈深处处于一种活跃的伸展状态(邵济安等,1998)。岩墙群和花岗岩大规模的侵位也是岩石圈伸展的重要证据。因此,通过本次年代学研究结果以及结合前人对区域构造演化的认识,认为维拉斯托 Sn 矿床很可能形成于早白垩世时期区域岩石圈的伸展构造背景中。

6 结 论

(1) 在维拉斯托斑岩型 Sn 矿床石英斑岩中,获得锆石 LA_ICP_MS U_Pb 定年结果为(135.7 ± 0.9) Ma (MSWD = 1.4, n = 24),该年龄稍早于矿床中辉钼矿的 Re_Os 同位素年龄((125.7 ± 3.8) Ma, MSWD = 1.7),表明成岩和成矿均形成于燕山晚期的早白垩世。

(2) 新发现的维拉斯托斑岩型 Sn 矿床与大兴安岭中南段地区众多的岩浆_热液矿床形成时代基本一致,推测矿床很可能形成于中生代岩石圈的伸展构造背景之中。

志 谢 锆石 LA_ICP_MS U_Pb 分析得到中国地质大学(北京)科学研究院苏犁老师和张红雨老师的帮助,在此表示感谢。

References

Anderson T. 2002. Correction of common lead in U_Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb[J]. *Chemical Geology*, 192(1_2): 59_79.

Belousova E A, Griffin W L, Pearson N J. 1998. Trace element composition and catholuminescence properties of southern African kimberlitic zircons[J]. *Mineralogical Magazine*, 62: 355_366.

Chang Y and Lai Y. 2010. Study on characteristics of ore-forming fluid and chronology in the Yindu Ag_Pb_Zn polymetallic ore deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46(4): 581_593(in Chinese with English abstract).

Huang D L, Zhu L T, Hou Y Q, Wang J, Liu J B, Chen Y L, Wang Z and Li D P. 2014. Geochemistry of granitoid rocks of Weilasituo deposits, Inner Mongolia and its tectonic significance[J]. *Geoscience*, 28(6): 1122_1137(in Chinese with English abstract).

Jiang S H, Nie F J, Liu Y F and Yun F. 2010. Sulfur and lead isotopic compositions of Bairendaba and Weilasituo silver-polymetallic deposits, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 28(1): 101_112(in Chinese with English abstract).

Kuang Y S, Zheng G R, Lu M J, Liu Y L, Zhang S J, Li Y L, Zhang S J, Li R Y and Cheng W J. 2014. Basic characteristics of Shuangjianzishan silver polymetallic deposit in Chifeng City, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 33(4): 847_856(in Chinese with English abstract).

Liu J J, Xing Y L, Wang J P, Zhai D G, Yao M J, Wu S H and Fu C. 2010. Discovery of falkmanite from the Bairendaba superlarge Ag_Pb_Zn polymetallic deposit, Inner Mongolia and its origin significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(3): 565_572(in Chinese with English abstract).

Liu J M, Zhang R and Zhang Q Z. 2004. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 269_273(in Chinese with English abstract).

Liu Y F, Jiang S H and Zhang Y. 2010. The SHRIMP zircon U_Pb dating and geological features of Bairendaba diorite in the Xilinhaote area, Inner Mongolia, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 688_696(in Chinese with English abstract).

Liu Y F, Fan Z Y, Jiang H C, Nie F J, Jiang S H, Ding C W and Wang F X. 2014. Genesis of the Weilasituo_Bairendaba porphyry_hydrothermal vein type system in Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2373_2385(in Chinese with English abstract).

Liu Y, Jiang S H, Zhang Z G, Liu Y F and Niu F J. 2011. Mineralogy of Bairendaba and Weilasituo silver-polymetallic deposits in Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 10(5): 837_854(in Chinese with English abstract).

Mao J W, Zhang Z H, Yu J J, Wang Y T and Niu B G. 2003. Geodynamic settings of large-scale metallogeny in north China and adjacent areas in Mesozoic: implications from precisely mineralization ages[J]. *Science in China(Series. D)*, 33(4): 289_299(in Chinese with English abstract).

Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169_188(in Chinese with English abstract).

McInnes B A, Evans N J, Fu F Q and Garwin S. 2005. Application of thermochronology to hydrothermal ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 58: 467_498.

Mei W, Lü X B, Tang R K, Wang X D and Zhao Y. 2015. Ore-forming fluids and its evolution of Bairendaba_Weilasituo deposits in west slope of southern Great Xing'an Range[J]. *Earth Science*, 40(1): 145_162(in Chinese with English abstract).

Ouyang H G, Mao J W, Santosh M, Wu Y, Hou L and Wang X F. 2014. The Early Cretaceous Weilasituo Zn_Cu_Ag vein deposit in the southern Great Xing'an Range, northeast China: Fluid inclusions, H, O, S, Pb isotope geochemistry and genetic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 56: 503_515.

Qi L, Zhou M F, Yan Z F, Pi D H and Hu J. 2006. An improved Carius tube technique for digesting geological samples in the determination

- for PGEs and Re by ICP_MS[J]. *Geochimica*, 35(6): 667_674 (in Chinese with English abstract).
- Shao J A, Zhang L Q, Mou B L. 1998. Tectonic_thermal evolution of middle_southern section of the Da Hinggan area in Mesozoic [J]. *Science in China (Series D)*, 28(3): 193_200 (in Chinese with English abstract).
- Shao J A, Zhang L Q and Mou B L. 1999. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan Mts [J]. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 339_346 (in Chinese with English abstract).
- Shao J A, Zhang L Q, Xiao Q H and Li X B. 2005. Rising of Da Hinggan Mts in Mesozoic: A possible mechanism of intracontinental orogeny [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 792_793 (in Chinese with English abstract).
- Sheng J F, Fu X Z and Li H N. 1999. Metallogenetic environment and geological characteristics of copper_polymetallic ore deposits in middle part of Da Hinggan Mts [M]. Beijing: Geological Publishing House. 139_169 (in Chinese).
- 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.
- Wang X L, Liu J J, Zhai D G, Yang Y Q, Wang J P, Zhang Q B, Zhang A L, Li Y L, Wang X L and Yang Z H. 2014. Mineral composition of Bianjiadayuan Pb_Zn_Ag polymetallic deposit in Inner Mongolia and its origin significance [J]. *Geoscience*, 28(1): 73_86 (in Chinese with English abstract).
- Wang X Y, Hou Y Q, Wang J, Chen Y L, Liu J B, Wang Z and Li D P. 2013. SHRIMP geochronology and Hf isotope of zircons from granitoids of the Weilasituo deposit in Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 27(1): 67_78 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Q H, Qiu R Z, Wu G Y, Xing Z Y, Zhang Y and Tong J S. 2006. Mesozoic asthenospheric upwelling orogeny in eastern China [J]. *Geology in China*, 33(4): 730_747 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Sun S and Li J L. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan China: Implication for the continental growth of central Asia [J]. *American Journal of Science*, 304: 370_395.
- Xu Z G and Zhang D Q. 1993. Ore_forming tectonic setting background of copper_polymetallic deposits in southeastern Inner Mongolia. Symposium of copper_polymetallic deposits in Daxinganling and adjacent areas [M]. Beijing: Earthquake Publishing House. 22_41 (in Chinese).
- Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L, Jia C S, Yu C M, Ye J and Liu H T. 2009. Geology and lead isotope study of the Baiyinnuoer Zn_Pb_Ag deposit, south segment of the Da Hinggan Mountains, northeastern China [J]. *Resource Geology*, 59: 170_180.
- Zhai D G, Liu J J, Wang J P, Peng R M, Wang S G, Li Y X and Chang Z Y. 2009. Re_Os isotopic chronology of molybdenite from the Taipinggou porphyry_type molybdenum deposit in Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Geosciences*, 23(2): 262_268 (in Chinese with English abstract).
- Zhai D G, Liu J J, Wang J P, Yang Y Q, Zhang H Y, Wang X L, Zhang Q B, Wang G W and Liu Z J. 2014. Zircon U_Pb and molybdenite Re_Os geochronology, and whole_rock geochemistry of the Hashitu molybdenum deposit and host granitoids, Inner Mongolia, NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 144_160.
- Zhai D G, Liu J J, Yang Y Q, Wang J P, Ding L, Liu X W, Zhang M, Yao M J, Su L and Zhang H Y. 2012. Petrogenetic and metallogenetic ages of the Huanggangliang Fe_Sn deposit, Inner Mongolia and its tectonic setting [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 513_523 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q and Zhao Y M. 1993. Proceedings of copper_ploymetallic deposits in the DaHinggan Mountains and its adjacent area [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1_161 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Z, Li X R, Yang H Z and Shao J. 2007. Structural conditions of copper_polymetallic mineralization in the southeast section of Daxinganling mountains [J]. *Geology and Resources*, 16(1): 38_41 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M and Zhang D Q. 1997. Metallogenetic regularity and prospective evaluation of the copper_polymetallic deposits in Daxinganling and adjacent areas [M]. Beijing: Earthquake Publishing House. 1_318 (in Chinese).
- Zhou Z H, Lü L S, Feng J R, Li C and Li T. 2010a. Molybdenite Re_Os ages of Huanggangliang skarn Sn_Fe deposit and their geological significance, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 667_679 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Lü L S, Yang Y J and Li T. 2010b. Petrogenesis of the Early Cretaceous A_type granite in the Huanggang Sn_Fe deposit, Inner Mongolia: Constraints from zircon U_Pb dating and geochemistry [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3521_3537 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常勇, 赖勇. 2010. 内蒙古银都银铅锌多金属矿床成矿流体特征及成矿年代学研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 46(4): 581_593.
- 黄丁伶, 朱洛婷, 侯青叶, 王瑾, 刘金宝, 陈岳龙, 王忠, 李大鹏. 2014. 内蒙古维拉斯托矿区花岗岩类地球化学特征及其构造意义 [J]. *现代地质*, 28(6): 1122_1137.
- 江思宏, 聂凤军, 刘翼飞, 云飞. 2010. 内蒙古拜仁达坝及维拉斯托银多金属矿床的硫和铅同位素研究 [J]. *矿床地质*, 28(1): 101_112.
- 匡永生, 郑广瑞, 卢民杰, 刘艳林, 张少杰, 李洋, 程文景. 2014.

- 内蒙古赤峰市双尖子山银多金属矿床的基本特征[J]. 矿床地质, 33(4): 847_856.
- 刘家军, 邢永亮, 王建平, 翟德高, 姜梅娟, 吴胜华, 付超. 2010. 内蒙拜仁达坝超大型 Ag_Pb_Zn 多金属矿床中针硫锑铅矿的发现与成因意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(3): 565_572.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. 地学前缘, 11(1): 269_273.
- 刘妍, 江思宏, 张志刚, 刘翼飞, 聂凤军. 2011. 内蒙古拜仁达坝-维拉斯托银多金属矿床的矿相学特征[J]. 矿床地质, 10(5): 837_854.
- 刘翼飞, 江思宏, 张义. 2010. 内蒙古锡林浩特地区拜仁达坝矿区闪长岩体锆石 SHRIMP_{Pb} 定年及其地质意义[J]. 地质通报 29(5): 688_696.
- 刘翼飞, 樊志勇, 蒋胡灿, 聂凤军, 江思宏, 丁成武, 王丰翔. 2014. 内蒙古维拉斯托-拜仁达坝斑岩-热液脉状成矿体系研究[J]. 地质学报, 88(12): 2373_2385.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 王义天, 牛宝贵. 2003. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. 中国科学(D辑), 33(4): 289_299.
- 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.
- 梅微, 吕新彪, 唐然坤, 王祥东, 赵严. 2015. 大兴安岭南段西坡拜仁达坝-维拉斯托矿床成矿流体特征及其演化[J]. 地球科学, 40(1): 145_162.
- 漆亮, 周美夫, 严再飞, 皮道会, 胡静. 2006. 改进的卡洛斯管溶样等离子体质谱法测定地质样品中低含量铂族元素及铼的含量[J]. 地球化学, 35(6): 667_674.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊. 1998. 大兴安岭中南段中生代的构造热演化[J]. 中国科学(D辑), 28(3): 193_200.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊. 1999. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用[J]. 地学前缘, 6(4): 339_346.
- 邵济安, 张履桥, 肖庆辉, 李晓波. 2005. 中生代大兴安岭的隆起——一种可能的陆内造山机制[J]. 岩石学报, 21(3): 792_793.
- 盛继福, 付先政, 李鹤年. 1999. 大兴安岭中南段成矿环境与铜多金属矿床地质特征[M]. 北京: 地震出版社. 139_169.
- 王喜龙, 刘家军, 翟德高, 杨永强, 王建平, 张琪彬, 张安利, 李彦林, 王晓亮, 杨增海. 2014. 内蒙古边家大院铅锌银多金属矿床的矿物组成及其成因意义[J]. 现代地质, 28(1): 73_86.
- 王新宇, 侯青叶, 王瑾, 陈岳龙, 刘金宝, 王忠, 李大鹏. 2013. 内蒙古维拉斯托矿床花岗岩类 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素研究[J]. 现代地质, 27(1): 67_78.
- 肖庆辉, 邱瑞照, 伍光英, 邢作云, 张昱, 董劲松. 2006. 中国东部中生代软流层上涌造山作用[J]. 中国地质, 33(4): 730_747.
- 徐志刚, 张德全. 1993. 内蒙古东南部铜多金属矿床成矿构造背景. 大兴安岭及邻区铜多金属矿床论文集[M]. 北京: 地震出版社. 22_41.
- 翟德高, 刘家军, 王建平, 彭润民, 王守光, 李玉玺, 常忠耀. 2009. 内蒙古太平沟斑岩型钼矿床 Re-Os 等时线年龄及其地质意义[J]. 现代地质, 23(2): 262_268.
- 翟德高, 刘家军, 杨永强, 王建平, 定立, 刘星旺, 张梅, 姜梅娟, 苏犁, 张红雨. 2012. 内蒙古黄岗梁铁锡矿床成岩-成矿时代与构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 513_523.
- 张德全, 赵一鸣. 1993. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床论文集[M]. 北京: 地质出版社. 1_162.
- 张永正, 李秀荣, 杨宏智, 邵军. 2007. 大兴安岭东南段铜多金属成矿构造条件[J]. 地质与资源, 16(1): 38_41.
- 赵一鸣, 张德全. 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价[M]. 地震出版社. 1_318.
- 周振华, 吕林素, 冯佳睿, 李超, 李涛. 2010a. 内蒙古黄岗夕卡岩型锡铁矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(3): 667_679.
- 周振华, 吕林素, 杨永军, 李涛. 2010b. 内蒙古黄岗锡矿区早白垩世 A 型花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学制约[J]. 岩石学报, (12), 3521_3537.