



吉林中部锑矿床成矿流体特征及其意义 ——以大秃顶子、植林、幸福屯锑矿为例

许国雨,任 龙,王存柱,郑大贺,李国郡,陈 宇,毛永新,崔雪文,朱荣利

中国地质调查局 牡丹江自然资源综合调查中心,黑龙江 牡丹江 157021

摘 要: 吉林中站地区分布着一系列金、锑、铜镍矿床,成矿地质条件良好。对大秃顶子、幸福屯、植林 3 个锑矿床辉锑矿主成矿期石英流体包裹体进行显微测温研究和稳定同位素(H、O、S)分析,结果表明,流体包裹体主要发育有 3 种类型:Ⅰ型富液两相($L_{H_2O}+V_{H_2O}$)包裹体,Ⅱ型纯液相(H_2O)包裹体,Ⅲ型气相包裹体。包裹体均一温度范围为 121.5~281.5 °C,盐度范围为 3.39%~10.73%,估算密度范围为 0.833~0.985 g/cm³,成矿流体为中低温、低盐度、低密度。H-O 同位素组成特征显示, $\delta^{18}O$ 变化范围为 15.71‰~18.28‰, δD 变化范围为 -111.1‰~-83.8‰,成矿流体主要是岩浆热液,后期有大气降水加入。黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 范围在 -8.25‰~-3.86‰,辉锑矿的 $\delta^{34}S$ 范围在 -8.18‰~-7.67‰, $\delta^{34}S$ 值范围较为集中,明显区别于岩浆硫,成矿物质主要来源于地壳。锆石 U-Pb 测年结果显示,区内侵入岩的结晶年龄为 205±2.7 Ma、192±1.9 Ma、195±1.9 Ma。锑矿床形成与岩浆热液联系密切,矿床成矿时代为晚三叠—早侏罗世。吉林中部锑矿床成因类型为浅成中低温热液型矿床。

关键词: 锑矿床;流体包裹体;稳定同位素;成矿时代;矿床成因;吉林省

ORE-FORMING FLUID CHARACTERISTICS AND IMPLICATION OF ANTIMONY DEPOSITS IN CENTRAL JILIN PROVINCE: A Case Study of Datudingzi, Zhilin and Xingfutun Antimony Deposits

XU Guo-yu, REN Long, WANG Cun-zhu, ZHENG Da-he, LI Guo-jun, CHEN Yu,
MAO Yong-xin, CUI Xue-wen, ZHU Rong-li

Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Mudanjiang 157021, Heilongjiang Province, China

Abstract: A series of gold, antimony and copper-nickel deposits are distributed in central Jilin Province with favorable metallogenic geological conditions. The study of microscopic temperature measurement and stable isotopes(H, O and S) for the quartz fluid inclusions in the major metallogenic period of stibnite in Datudingzi, Xingfutun and Zhilin antimony deposits shows that there are three main types of fluid inclusions including Type-I of liquid-rich two-phase ($L_{H_2O}+V_{H_2O}$) inclusion, Type-II of pure liquid phase (H_2O) inclusion, and Type-III of gas-phase inclusion, with the homogenization temperature of 121.5–281.5 °C, salinity of 3.39%–10.73%, and estimated density of 0.833–0.985 g/cm³. The ore-forming fluid is characterized by low-medium temperature, low salinity and low density. The H-O isotopic composition

收稿日期:2022-08-02;修回日期:2022-09-08. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局项目“吉林大车背沟等 8 幅 1:5 万矿产地质调查”(DD202008010).

作者简介:许国雨(1992—),男,硕士,主要从事固体矿产勘查及相关成矿理论研究,通信地址 黑龙江省牡丹江市东安区卧龙街 45 号,E-mail//xuguoyu@mail.cgs.gov.cn

通信作者:任龙(1988—),男,硕士,主要从事矿床学、岩石学、矿物学研究,通信地址 黑龙江省牡丹江市东安区卧龙街 45 号,E-mail//renlong@mail.cgs.gov.cn

characteristics show that $\delta^{18}\text{O}$ is 15.71‰–18.28‰, and δD from -111.1‰ to -83.8‰. The ore-forming fluid is dominated by magmatic hydrothermal fluid, mixed with later atmospheric precipitation. The $\delta^{34}\text{S}$ of pyrite ranges from -8.25‰ to -3.86‰, and that of stibnite from -8.18‰ to -7.67‰. The range of $\delta^{34}\text{S}$ values is relatively concentrated, obviously different from magmatic sulfur. The metallogenic materials are mainly derived from the crust. The zircon U-Pb dating results reveal that the crystallization ages of the intrusive rocks are 205 ± 2.7 Ma, 192 ± 1.9 Ma and 195 ± 1.9 Ma respectively. The formation of antimony deposit is closely related to magmatic hydrothermal fluid, aged in Late Triassic–Early Jurassic. The antimony deposits in central Jilin Province are of epithermal-mesothermal type genetically.

Key words: antimony deposit; fluid inclusion; stable isotope; metallogenic age; genesis of deposit; Jilin Province

0 引言

吉林省中部分布一系列金、锑、铜镍矿床,具有良好的成矿地质条件,是金锑多金属矿床的重要找矿区段。本研究的大秃顶子、植林、幸福屯锑矿床均位于桦甸市境内,此外,该地区还有二道甸子、南天门、腰岭子、偏岭子等金(锑)矿床^{①②③④}。本区矿床的开采工作早在20世纪30年代便有记载,至20世纪末一直以开采辉锑矿为主。随着近年来地质普查工作的开展,大秃顶子伴生金矿体陆续被发现,引起学者关注与研究。相比而言,大秃顶子锑矿床有一定研究成果,矿床位于漂河川构造混杂岩带,周树亮等^[1]对大秃顶子金矿床的构造背景、矿床地质特征进行了阐述,初步探讨了矿床成因;赵际新等^[2]报道了该矿床金矿找矿的最新进展,认为其成矿类型属受地层内破碎带控制的低温热液型金矿床。但当前对该地区矿床的研究仍然较少,皆为针对大秃顶子金矿化开展的研究,对锑矿找矿研究不多,而该区域多个矿床显示金元素与锑元素成矿关系密切,作为金的重要伴生元素,锑矿化线索是金矿化的主要标志。对该地区锑矿床有针对性地开展研究,有利于系统性地探讨该地区成矿规律,为金矿找矿提供最直接的找矿标志,同时作为我国重要优势矿种之一,对锑矿床本身也有重要意义。本文在前人研究和野外地质工作的基础上,通过对大秃顶子、幸福屯、植林3个锑矿床主成矿期的石英开展流体包裹体和稳定同位素(H、O、S)分析,探讨成矿物质来源和流体性质,分析矿床成因,为工作区找矿预测提供支撑。

1 成矿地质背景

1.1 区域地质

研究区大地构造所处Ⅰ级构造单元为天山–兴蒙造山系,Ⅱ级构造单元为小兴安岭–张广才岭岩浆弧,Ⅲ级构造单元为张广才岭岩浆弧。大地构造位置在松嫩地块兴蒙造山带东段南部,处于佳–伊断裂与敦–密断裂之间,紧邻敦–密断裂中段(辉发河断裂),属于亚洲洋构造域与滨太平洋构造域叠合部位,经历古亚洲洋的闭合、古太平洋板块的俯冲和中新世断陷等构造演化作用,地质构造十分复杂^[3–6]。

根据《吉林省地质志》,研区内出露地层主要为寒武系、二叠系、白垩系和更新统(图1)。本次工作通过1:5万矿产地质调查项目,采用构造填图方法将研究区寒武系黄莺屯岩组重新厘定为构造混杂岩带(尚未发表),将二叠系东南岔组重新厘定为范家屯组。区域上辉发河断裂穿过研究区,富尔河断裂与其在南部交汇,在不同时期多组应力场下构造作用十分复杂,表现为断裂、褶皱和弧形构造发育。二道甸子–漂河岭复式背斜横贯全区,构成区内主要构造格架。断裂主要为辉发河断裂及其次级断裂。此外,研究区发育3条弧形构造带^[7],实质为二道甸子–漂河岭复式背斜南西倾没端,地窰子南–二道沟、梨树沟–大秃山两条弧形构造带近平行北西向展布,二道甸子–蛇岭沟弧形构造带由二道甸子向北西延伸。3条弧形构造带对成矿具有一定的控制作用。受中生代滨太平洋构造运动的影响,区域内发生强烈的岩浆活动,形成了区内大面积分

①吉林省有色金属地质勘查局 607 队,吉林省中部地区二道甸子金矿区外围金锑矿普查报告, 2003。

②吉林省第二地质调查所,吉林省桦甸市桦树乡锑矿矿产储量核实情况说明书, 2005。

③吉林省第二地质调查所,吉林省桦甸市二道甸子镇幸福锑矿矿产储量核实情况说明书, 2003。

④吉林省有色金属地质勘查局 607 队,吉林省桦甸市大秃顶子金锑矿勘探报告, 2017。

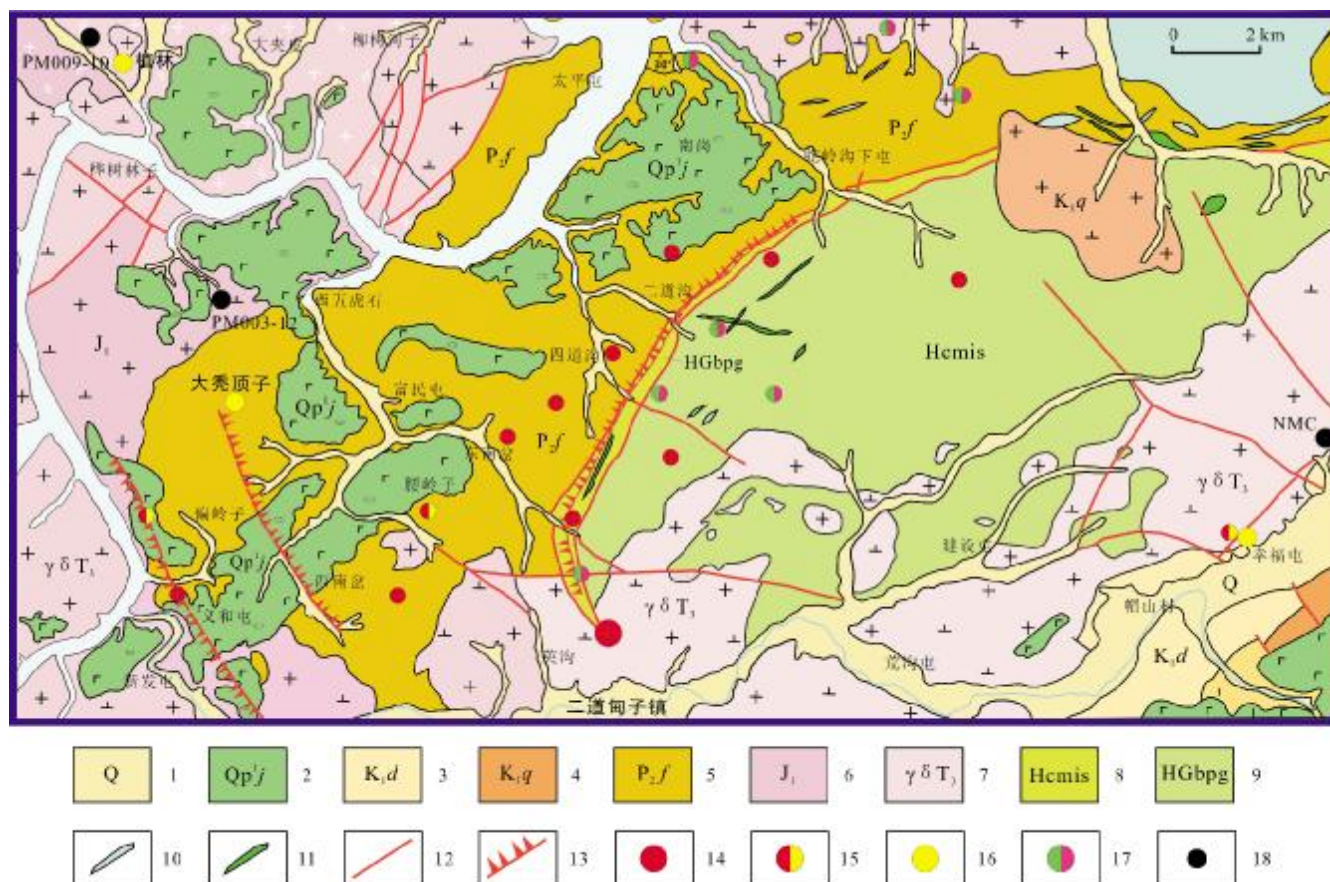


图1 研究区区域地质矿产图

Fig. 1 Regional geology and mineral map of the study area

1—第四系(Quaternary); 2—军舰山组玄武岩(basalt of Junjianshan fm.); 3—大砬子组砂岩(sandstone of Dalazi fm.); 4—泉水村组流纹质凝灰熔岩(rhyolitic tuff lava Quanshuicun fm.); 5—范家屯组砂岩(sandstone of Fanjiatun fm.); 6—早侏罗世侵入岩(Early Jurassic intrusive rock); 7—晚三叠世花岗闪长岩(Late Triassic granodiorite); 8—寒葱沟二云(石英)片岩(Hancongou two-mica/quartz schist); 9—荒岭沟黑云斜长片麻岩(Huanglinggou biotite plagiogneiss); 10—闪长玢岩脉(diorite porphyrite dike); 11—辉长岩脉(gabbro dike); 12—断裂(fault); 13—弧形构造(arc structure); 14—金矿(点)(Au deposit/occurrence); 15—金锑矿(点)(Au-Sb deposit/occurrence); 16—锑矿(点)(Sb deposit/occurrence); 17—铜镍矿(点)(Cu-Ni deposit/occurrence); 18—花岗岩采样位置(granite sampling position)

布的早侏罗世花岗岩,岩性以花岗闪长岩、二长花岗岩为主。早白垩世侵入岩亦有分布,其中早侏罗世侵入岩与成矿关系较为密切。

1.2 矿床地质

大秃顶子(金)锑矿床位于吉林省桦甸市北东部,地层出露主要有古生界中二叠统范家屯组和新生界第四系。范家屯组为一套浅海相碎屑沉积建造,岩性主要为粉砂(细砂)质板岩、千枚状板岩、变质砂岩,与花岗岩体接触带附近变质为红柱石角岩、堇青石角岩、绢云母角岩等。岩层倾向以北西为主,倾角 35~60°。矿区处在二道甸子-漂河岭复式背斜、梨树沟-大秃山弧形构造带上,其中北北东向、北东向断裂构造与成矿关

系密切。矿区出露中细粒花岗闪长岩,岩体侵入到范家屯组地层中。矿区已发现 3 个近于平行的含矿系统,总体走向北东向,倾向南东,倾角 35~45°。矿化主要分布于破碎蚀变带中,呈透镜状及细脉状。矿化带走向 25~70°,倾向南东,倾角 40~70°,断续延长 2 km 以上。矿石主要为含辉锑矿石英脉型,金属矿物有辉锑矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、毒砂等;脉石矿物主要为石英、白云母。矿石主要为粒状结构,晶簇、晶洞、角砾状、致密块状、网脉状和条带状构造(图 2a、d)。其中辉锑矿主要呈针状、星点状、网脉状分布。围岩蚀变有硅化、绢云母化、黄铁矿化和绿泥石化。

植林锑矿床位大秃顶子锑矿北部,区内分布大面

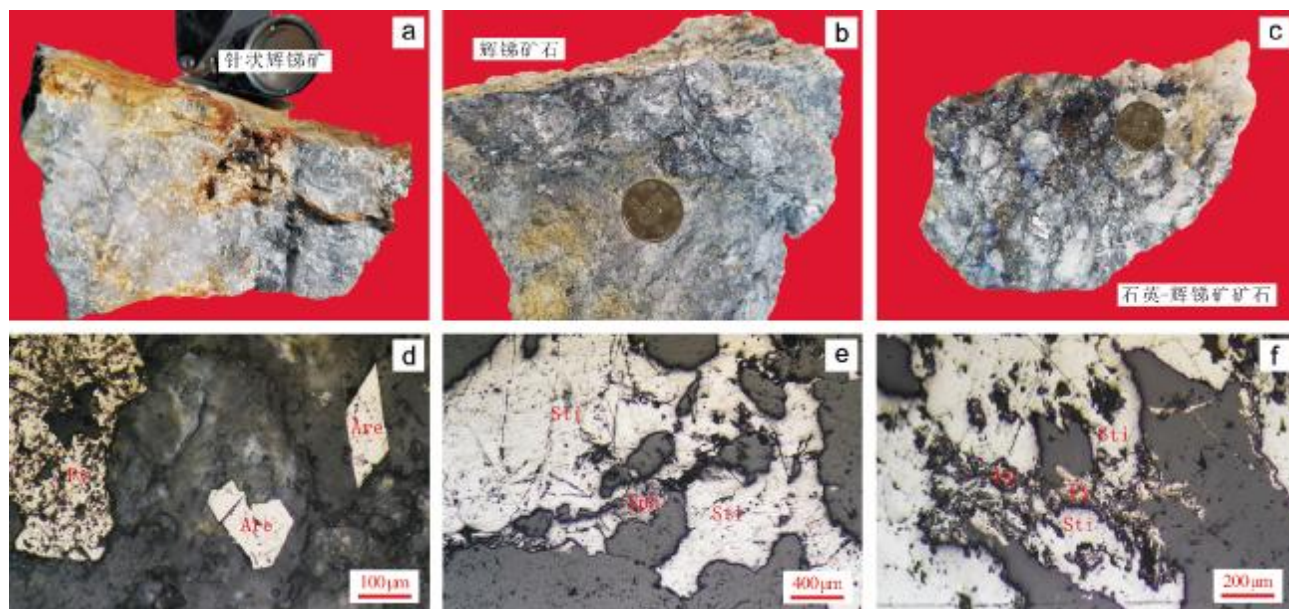


图2 锑矿床矿石标本及镜下特征

Fig. 2 Ore specimens and microscopic characteristics of antimony deposit

a, d—大秃顶子 2021DTDZ-2 (Datudingzi deposit); b, e—植林 2021ZSC-1 (Zhilin deposit); c, f—幸福屯 2021XFT-3 (Xingfutun deposit); Py—黄铁矿(pyrite); Are—毒砂(arsenopyrite); Sti—辉锑矿(stibnite); Sph—闪锌矿(sphalerite)

积中细粒二长花岗岩,为花岗结构,块状构造。区内构造以东西向和南北向两组构造为主,主要控矿构造为一产状 $100^{\circ} \angle (35 \sim 55)^{\circ}$ 的构造破碎带。矿体主要产于石英脉中,严格受破碎蚀变带控制,多呈透镜状、扁豆状及小脉顺构造带贯入,与围岩界线清楚。矿石类型为石英脉型辉锑矿,矿石矿物以辉锑矿为主,含少量的黄铁矿、毒砂和金。辉锑矿呈长柱状、针状、条带状、网脉状、团块状和星点状分布(图 2b,e)。脉石矿物以石英为主,次为绿泥石和绢云母。围岩蚀变有高岭土化、绢云母化、绿泥石化、硅化、黄铁矿化和碳酸盐化。

幸福锑矿床位于大秃顶子东侧,区内出露地层主要为第四系松散堆积物,分布于沟谷之中,以冲积的砂砾石层和黄土为主。区内分布大面积中粗粒似斑状花岗闪长岩,岩体呈岩基状产出,沿二道甸子背斜轴呈北东向展布。该岩体是赋矿围岩。区内控矿构造主要是一条近东西走向构造破碎带。矿区内已发现有 3 条矿体,总体倾向南东,主要顺构造带贯入,与围岩界线清楚。矿石类型为含锑石英脉,矿石为深灰色。矿石矿物以辉锑矿为主,含少量的黄铁矿、毒砂和金,其中金品位 $0.1 \times 10^{-6} \sim 9.4 \times 10^{-6}$ 。辉锑矿呈条带状、网脉状、团块状和星点状分布,多为自形-半自形晶,呈长柱状和针状(图 2c,f)。脉石矿物以石英为主,次为绿泥石和绢云

母。围岩蚀变有高岭土化、绢云母化、绿泥石化、硅化、黄铁矿化。

2 样品采集与测试

流体包裹体样品采自大秃顶子、植林、幸福屯锑矿床的辉锑矿-石英脉矿石,制成包裹体抛光片。包裹体岩相学和流体包裹体测温分析由北京铂年领航科技有限公司完成,测温使用仪器为英国 Linkam THMSG 600 型冷热台,检测方法依据《EJ/T1105—1999 矿物流体包裹体温度的测定》执行。仪器温度标定采用标准物质以及人工合成的具已知均一温度、盐度的 NaCl-H₂O 包裹体。冰点测定时,先降温至 -80°C 或 -100°C 使包裹体结冰呈固相,然后升温,速率由开始的 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 逐渐降低为 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$,临近相变点时降至 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 或 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测试精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。均一温度测定时,开始时的升温速率为 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$,临近相变点时降至 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 或 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测试精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

硫同位素样品采自 3 个矿床辉锑矿-石英脉矿石,挑选辉锑矿和黄铁矿测试。样品测试在北京铂年领航科技有限公司完成,采用仪器设备为赛默飞 253 Plus 气体稳定同位素质谱仪、Flash EA 元素分析仪和 Conflo IV 多用途接口。炉温 1020°C ,载气流速

120 mL/min, 注氧流速 150 mL/min, 注氧时间 5 s, 色谱柱温度 90 °C. 采用 IAEA-S3、GBW04414 和 GBW04415 三种标准物质, 标样的分析精度优于 0.2‰.

年龄样品采自锑矿床外围侵入岩体(图 1), 单矿物挑选、制靶照相、分析测试及数据处理均在中国冶金地质总局山东局测试中心实验室完成. 实验所采取的激光剥蚀系统为美国 Conherent 公司生产的 GeoLasPro 193 nm ArF 准分子系统, ICP-MS 型号为 ThermoFisher 公司生产的 iCAPQ. 激光剥蚀采样过程以氦气作为载气, 氮气为辅助气. 同位素比值采用标准锆石 91500(同位素稀释-热电离质谱法 ID-TIMS 定年结果 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}=1\ 063.35\ \text{Ma}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=1\ 062.45\ \text{Ma}$) 进行校正. 样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICPMSDataCal 数据处理程序, U-Pb 谐和图、年龄分布频率图绘制和年龄权重平均计算采用 Isoplot 3.0 程序完成.

3 样品测试结果

3.1 流体包裹体

3.1.1 岩相学特征

1) 大秃顶子(金)锑矿

室温下, 偏光显微镜下观察发现流体包裹体分布于石英颗粒内部、生长环带或裂隙内. 根据包裹体形态、相态等岩相学特征, 将包裹体分为 3 种类型: I 型富液两相($\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$)包裹体、II 型纯液相(H_2O)包裹体、III 型气相包裹体(图 3a、b、c). 各类型包裹体具体特征如下:

I 型富液两相($\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$)包裹体, 灰白色, 透明-半透明, 呈椭圆形、不规则形、长条形离散分布, 大小 3~8 μm , 气液比为 5%; II 型纯液相包裹体, 多无色透明, 呈圆形-椭圆形, 数量多, 体积小, 大小 2~4 μm , 群簇分布, 多为低温捕获次生包裹体; III 型气相包裹体, 灰色-灰黑色, 半透明, 呈不规则形离散分布, 大小 3~

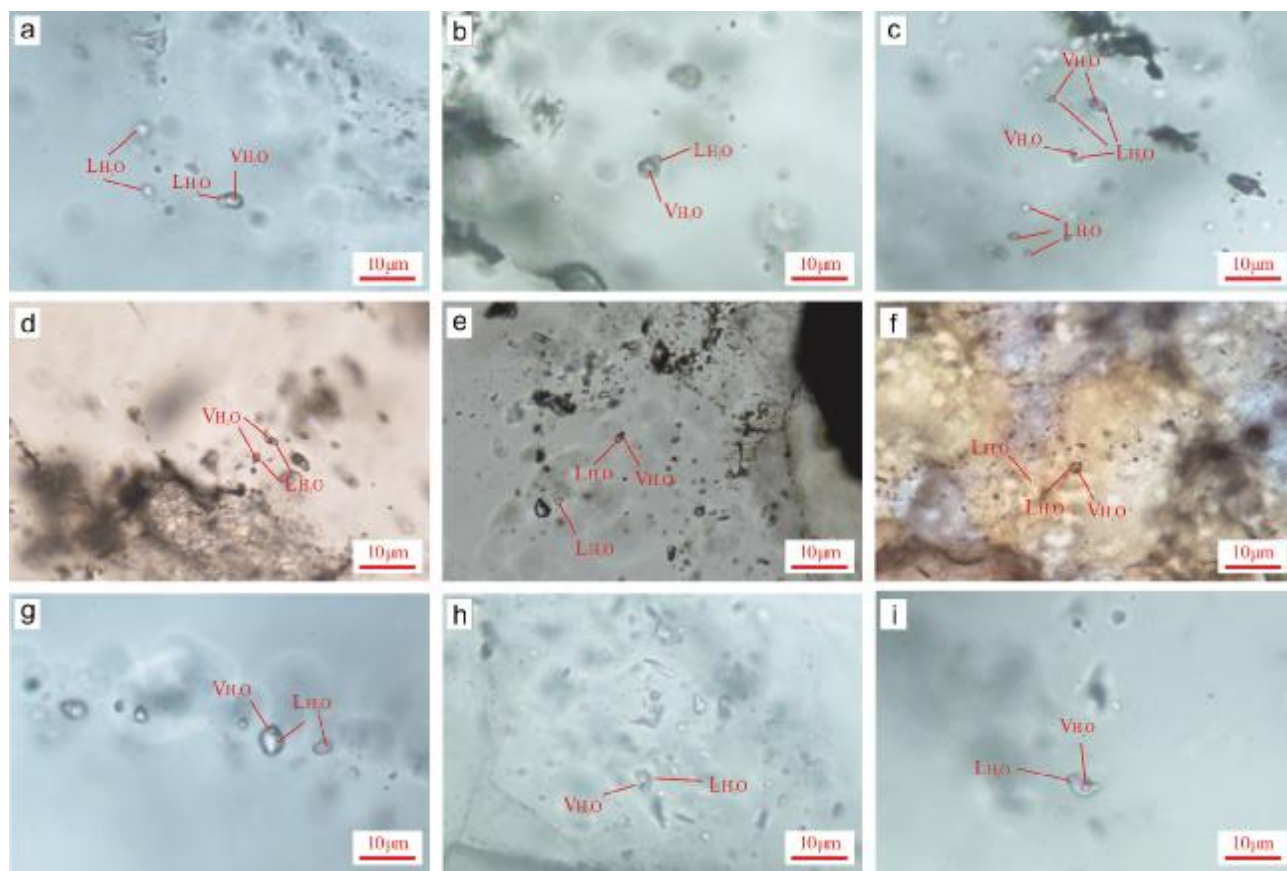


图 3 流体包裹体显微照片

Fig. 3 Microphotographs of fluid inclusions

a, b, c—大秃顶子 I 型和 II 型包裹体(types I and II inclusions in Datudingzi Sb deposit); d, e, f—植林 I 型和 II 型包裹体(types I and II inclusions in Zhilin Sb deposit); g, h, i—幸福屯 I 型和 II 型包裹体(types I and II inclusions in Xingfutun Sb deposit)

6 μm , 室温下 CO_2 呈单相, 体积分数约为 5%.

2) 植林铈矿

岩相学观察发现, 流体包裹体分布于石英颗粒内部、生长环带或裂隙内, 丰度较高但体积较小, 不易观察. 室温下见以下类型包裹体(图 3d、e、f):

I 型富液气液两相盐水包裹体, 灰白-灰黑色, 透明-半透明, 呈椭圆形、不规则形以离散状分布, 大小 3~5 μm , 气液比约 5%, 为测温的主要对象; II 型纯液相包裹体, 多无色透明, 呈圆形-椭圆形, 大小 2~4 μm , 离散分布, 多为低温捕获次生包裹体.

3) 幸福屯铈矿

岩相学观察发现, 流体包裹体分布于石英颗粒内部、生长环带或裂隙内, 丰度较高. 室温下见以下类型包裹体(图 3g、h、i):

I 型富液气液两相盐水包裹体, 灰白色, 透明-半透明, 呈椭圆形、不规则形、长条形以离散状、孤岛状分布, 大小 3~12 μm , 气液比 5%~10%, 为测温的主要对象; II 型纯液相包裹体, 多无色透明, 圆形-椭圆形, 大小 2~3 μm , 主要呈群簇状、离散状分布, 多为低温捕获次生包裹体.

3.1.2 流体包裹体显微测温

本研究测试 9 件样品共获得流体包裹体气液两相的均一温度和盐度 69 组数据(见表 1). 盐度据文献[8]公式计算求得, 并绘制了均一温度和盐度直方图(图 4). 其中, 大秃顶子铈矿 3 件样品 17 组数据显示, 均一温度范围 200.5~281.5 $^{\circ}\text{C}$, 平均值 252.67 $^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 260~280 $^{\circ}\text{C}$; 冰点范围 -7.2~ -3.8 $^{\circ}\text{C}$; 盐度范围 6.16%~10.73%, 平均值 8.76%; 密度范围 0.833~0.915 g/cm^3 . 植林铈矿 4 件样品 32 组数据显示, 均一温度范围 121.5~210.2 $^{\circ}\text{C}$, 平均值 178.13 $^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 200~220 $^{\circ}\text{C}$; 冰点范围 -3.8~ -2.0 $^{\circ}\text{C}$; 盐度范围 3.39%~6.16%, 平均值 4.80%; 密度范围 0.884~0.985 g/cm^3 . 幸福屯铈矿 2 件样品 20 组数据显示, 均一温度范围 133.5~180.6 $^{\circ}\text{C}$, 平均值 158.44 $^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 180~200 $^{\circ}\text{C}$; 冰点范围 -4.9~ -3.0 $^{\circ}\text{C}$; 盐度范围 4.96%~7.73%, 平均值 6.25%; 密度范围 0.935~0.983 g/cm^3 .

综上可知, 3 个铈矿床成矿温度主要为中-低温范围. 根据测试及计算结果, 绘制了均一温度-盐度-密度相图(图 5), 可以看出成矿流体均为低盐度、低密度的不饱和溶液.

表 1 流体包裹体测温及盐度计算结果
Table 1 Temperature measurement and salinity calculation of fluid inclusions

样品号	主矿物	数量	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$		盐度/%, NaCl 当量		来源
			范围	平均值	范围	平均值	
21DTDZ1	石英	6	268.7~281.5	274.80	9.86~10.73	10.38	本文
21DTDZ2	石英	5	268.8~280.0	275.66	8.95~9.73	9.31	本文
21DTDZ3	石英	6	200.5~220.8	211.38	6.16~7.31	6.69	本文
21ZSC-1	石英	10	121.5~191.7	159.42	3.71~6.16	5.00	本文
21ZSC-2	石英	6	158.9~191.5	175.97	3.87~5.26	4.60	本文
21ZSC-3	石英	6	175.1~210.2	196.98	3.39~5.71	4.66	本文
21ZSC-4	石英	10	174.5~195.4	186.82	3.87~6.01	4.97	本文
21XFT1	石英	10	139.8~173.5	159.48	4.96~6.59	5.86	本文
21XFT2	石英	10	133.5~180.6	157.39	5.41~7.73	6.65	本文
21ED-4	石英	8	247.3~268.6	259.4	5.71~7.02	6.37	未发表数据
21ED-8	石英	7	248.9~277.6	262.4	6.30~7.45	6.92	未发表数据
21ED-9	石英	10	238.5~270.1	257.1	6.16~7.45	6.79	未发表数据

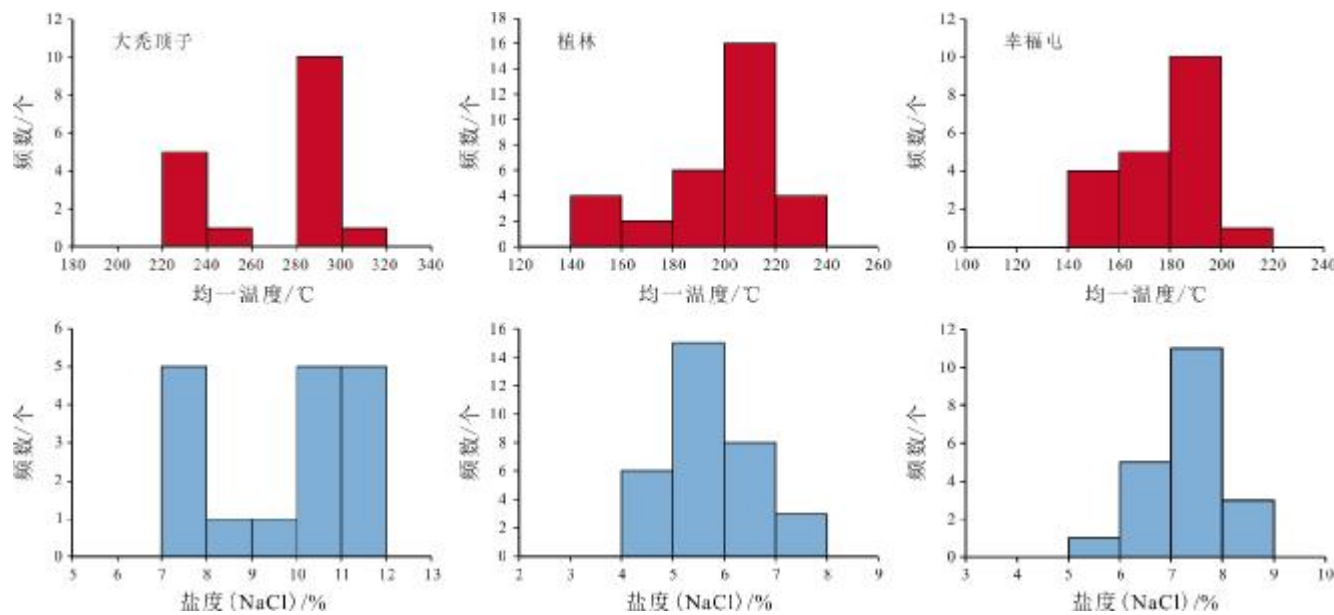


图 4 大秃顶子、植林、幸福电锑矿床流体包裹体均一温度和盐度直方图

Fig. 4 Histograms for homogenized temperature and salinity of fluid inclusions in Datudingzi, Zhilin and Xingfutun antimony deposits

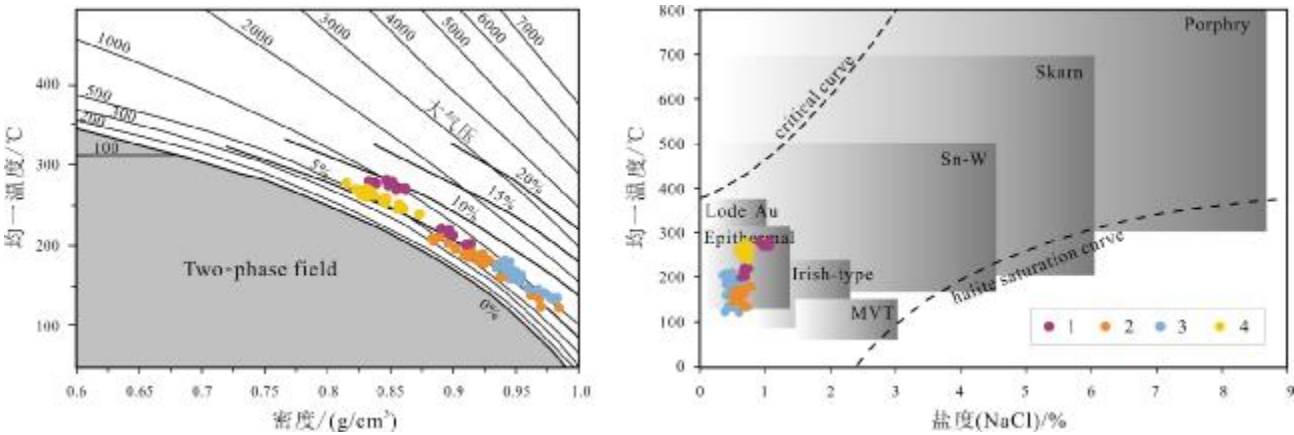


图 5 锑矿床流体包裹体 NaCl-H₂O 体系 $T-\rho$ 图解和均一温度-盐度关系图

(据文献[11-12])

Fig. 5 Diagrams of temperature vs. density and temperature vs. salinity for NaCl-H₂O system of fluid inclusions in antimony deposits

(After References [11-12])

1—大秃顶子锑矿(Datudingzi Sb deposit); 2—植林锑矿(Zhilin Sb deposit); 3—幸福电锑矿(Xingfutun Sb deposit); 4—二道甸子金矿(未发表数据)(Erdaodianzi Au deposit, unpublished data)

3.1.3 流体成矿压力及深度估算

根据已有温度、盐度、密度的关系,运用计算成矿压力的经验公式^[9],算出成矿压力:大秃顶子 6.04~8.66 MPa,平均 7.73 MPa;植林 3.59~6.25 MPa,平均 5.26 MPa;幸福电 4.03~5.49 MPa,平均 4.78 MPa. 利用 NaCl-H₂O 体系的 $T-\rho$ 相图,估算成矿流体均一时气相

饱和压力值,3 个矿床均主要集中在 5.00~10.00 MPa 范围内(图 5),其中大秃顶子略高,这与经验公式计算的结果基本一致. 根据脉状热液矿床深度与压力分段拟合的方程^[10],估算大秃顶子锑矿成矿深度为 0.1~0.36 km,表明 3 个矿床均为浅成锑矿床,这与包裹体均一温度-盐度图结果一致.

3.2 同位素特征

3.2.1 H-O 同位素

本研究选取成矿期 7 件样品进行了石英氢、氧同位素分析,其中大秃顶子 3 件、植林 2 件、幸福屯 2 件。氢、氧同位素测试数据见表 2。

表 2 锑矿床石英氢氧同位素组成
Table 2 Hydrogen and oxygen isotopic compositions of antimony deposits

样品号	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	温度/℃	来源
21DTDZ-1	16.04	-87.0	7.86	217	本文
21DTDZ-2	16.17	-88.5	7.99	217	本文
DTDZ-10H	15.71	-111.1	7.53	217	本文
ZSC-20H	18.28	-104.3	10.10	217	本文
ZSC-10H	17.61	-106.2	9.42	217	本文
21XFT-1	18.11	-86.2	9.93	217	本文
21XFT-2	17.75	-83.8	9.57	217	本文
21EDDZ-2	13.2	-94.0	5.04	217	未发表数据
21EDDZ-1	13.1	-95.5	4.96	217	未发表数据

根据测试结果,锑矿床 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 15.71‰~18.28‰,平均值为 17.10‰; δD 变化范围为-111.1‰~-83.8‰,平均值为-95.29‰。二道甸子金矿 $\delta^{18}\text{O}$ 为 13.1‰和 13.2‰, δD 为-94.0‰和-95.5‰。根据石英-水之间的氧同位素分馏方程 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}=\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}-1000\ln\alpha$,当温度在 200~500 ℃之间时,水与石英之间的氧同位素分馏系数为 $1000\ln\alpha=3.38\times10^6T^{-2}-3.4$ [13],计算得锑矿成矿水 $\delta\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$ 变化范围为 7.53‰~10.10‰,平均值 8.92‰。在氢-氧同位素图解(图 6)中,锑矿氢氧同位素均落入大气降水与岩浆水之间,岩浆水的下方,显示成矿流体具有大气降水与岩浆水的混合特征 [14]。

3.2.2 S 同位素

本研究共测试硫同位素 10 件,其中大秃顶子 6 件、植林 2 件、幸福屯 2 件。测试结果(表 3)显示,锑矿床中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化不大,范围在-8.25‰~-3.86‰,平均-5.85‰;辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 范围在-8.18‰~-7.67‰,平均值-7.88‰。

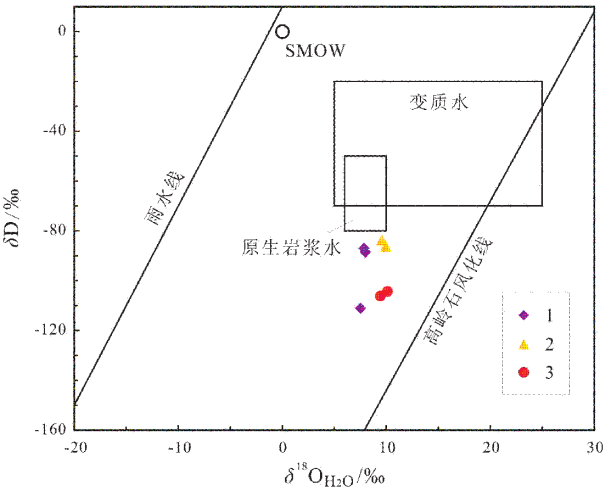


图 6 锑矿床成矿流体氢-氧同位素图解
Fig. 6 The $\delta^{18}\text{O}$ vs. δD diagram of ore-forming fluid in antimony deposit
1—大秃顶子锑矿(Datudingzi Au deposit); 2—幸福屯锑矿(Xingfutun Sb deposit); 3—植林锑矿(Zhilin Sb deposit)

表 3 锑矿床硫同位素组成
Table 3 Sulfur isotopic compositions of antimony deposit

样品号	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	来源
21DTDZ-1	黄铁矿	-3.86	本文
21DTDZ-2	黄铁矿	-4.21	本文
21DTDZ-3	辉锑矿	-7.67	本文
21DTDZ-4	辉锑矿	-7.76	本文
DTDZ-LE	黄铁矿	-5.41	本文
DTDZ-10H	黄铁矿	-5.34	本文
ZSC-20H	黄铁矿	-8.03	本文
ZSC-10H	黄铁矿	-8.25	本文
21XFT-3	辉锑矿	-8.18	本文
21XFT-4	辉锑矿	-7.90	本文
21EDDZ-1	黄铁矿	-2.69	未发表数据

3.3 岩浆岩锆石 U-Pb 测年

本研究 3 件样品分别采自幸福屯锑矿床外围花岗闪长岩(NMC)、植林锑矿床外围二长花岗岩(PM009-10)及大秃顶子锑矿床外围花岗闪长岩(PM003-12),岩石样品均采自新鲜露头。

幸福屯锑矿外围灰白色中粗粒似斑状花岗闪长岩:岩石呈灰白色,中粗粒似斑状花岗结构,块状构造。斑晶为斜长石、钾长石,含量 10%~15%,均为半自形

晶,大小一般 5~8 mm,星散状分布。斜长石斑晶含量 1%~5%,板状;钾长石斑晶含量 10%,板状。基质含量 85%~90%,为斜长石、钾长石、石英、黑云母,粒径 0.5~2 mm,含量 40%~50%,近半自形板状,定向分布。钾长石含量 20%~25%,半自形—他形粒状,略显定向分布;石英为他形粒状,定向分布,含量 22%~37%;黑云母片状,含量 3%。

大秃顶子外围灰白色中细粒花岗闪长岩:新鲜面灰白色,中细粒花岗结构,块状构造。岩石主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母组成。斜长石含量 60%~65%,半自形板状,粒径 1~6 mm,镶嵌状分布,局部被绢云母及绿帘石交代;钾长石含量 10%~15%,半自形—他形粒状,粒径 1~6 mm,星散状、填隙状分布,具轻微高岭土化;石英含量约为 20%,他形粒状,粒径 1~4 mm,填隙状分布;黑云母含量 5%~10%,片状,粒径 1~3 mm,星散状分布。蚀变矿物为绢云母、绿帘石、高岭土、绿泥石。

植林锑矿外围二长花岗岩:风化面多呈灰—灰白(褐)色,新鲜面浅肉红色,中细粒花岗结构。岩石主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母组成。斜长石为半自形板状,含量 45%~50%,大小 1~5 mm,部分达 8 mm,可见聚片双晶、卡钠复合双晶,少见肖钠双晶,被绢云母及少量白云母、黝帘石交代,斜长石牌号 An=27;钾长石为半自形—他形粒状,含量 30%~35%,大小 1~5 mm,杂乱分布,常见卡氏双晶、钠质条纹,条纹微细脉状,为固溶体出溶产物,局部略显活化,交代斜长石,使其略显净边等交代结构;石英呈他形粒状,含量 20%~25%,大小 1~5 mm,填隙状分布;黑云母为片状,含量小于 8%,片直径 0.1~0.5 mm,星散状分布,被绢云母及不透明矿物交代,呈假象。蚀变矿物为绢云母、白云母、高岭土、黝帘石,副矿物组合为磁铁矿+锑石+磷灰石。

样品中的锑石多为自形—半自形,长宽比 2:1~4:1。挑取的锑石呈长柱状,发育振荡环带结构,多数具有暗色增生边。Th/U 范围为 0.26~0.42(PM003-12)、0.31~0.52(NMC)、0.13~0.56(PM009-10),主要集中于 0.25~0.45,平均 0.35,说明样品中的锑石主体为岩浆锑石(图 7)。样品锑石 U-Pb 测试结果如表 4(扫描首页 OSID 二维码可见)。

样品 NMC 选取的 18 个测点 U-Pb 结果显示年龄

为 198~232 Ma,加权平均年龄为 205 ± 2.7 Ma ($n=18$, MSWD=3.6,置信度 97.0%),代表其侵位结晶年龄。样品 PM009-10 选取的 29 个测点 U-Pb 结果显示年龄为 177~226 Ma,加权平均年龄为 195 ± 1.9 Ma ($n=29$, MSWD=2.8,置信度 96.0%),代表其侵位结晶年龄。样品 PM003-12 选取的 29 个测点 U-Pb 结果显示年龄为 170~221 Ma,加权平均年龄为 192 ± 1.9 Ma ($n=29$, MSWD=2.6,置信度 95.0%),代表其侵位结晶年龄。

通过对 3 个典型锑矿床外围侵入岩(花岗闪长岩、二长花岗岩)开展锑石 U-Pb 测年研究,3 个样品 76 个测点 U-Pb 结果显示加权平均年龄为 205 ± 2.7 Ma、 192 ± 1.9 Ma、 195 ± 1.9 Ma,代表了其侵位结晶年龄。同位素年龄相差较小,表明它们可能形成于同一成岩成矿系统,成矿作用发生于晚三叠世—早侏罗世,属燕山早期成矿。

4 讨论

4.1 成矿流体性质和来源

流体包裹体特征及测温结果显示锑矿床成矿温度范围 121.5~281.5 °C,盐度范围 3.39%~10.73%,密度范围 0.833~0.985 g/cm³,成矿深度 0.1~0.36 km,表明成矿流体为中—低温、低盐度、低密度的不饱和流体,矿床为浅成锑矿床。H-O 同位素组成特征显示 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围为 15.71‰~18.28‰, δD 变化范围为 -111.1‰~-83.8‰。在 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 图中分布比较集中,位于大气降水与岩浆水中间部位,远离大气降水靠近岩浆水,表明成矿流体以岩浆水为主,具岩浆水和大气降水混合特征。

4.2 成矿物质来源

对比 3 个锑矿床,可知锑矿床矿石矿物主要有辉锑矿、黄铁矿,其次为毒砂、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、金,脉石矿物有石英、绢云母、绿泥石、黑云母、方解石、白云母等。因此成矿阶段的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以近似代表成矿流体中总硫同位素组成^[15]。结果显示锑矿床中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 范围在 -8.25‰~-3.86‰,辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 范围在 -8.18‰~-7.67‰, $\delta^{34}\text{S}$ 值范围较为集中,显示与岩浆来源的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(-3‰~+1‰)有明显区别^[16],表明其具混合硫特征,主要来源于壳源(地层),少部分来自岩浆热液。推断其成矿物质来源主要为周围的地层,部分来自于岩浆,岩浆为锑矿的形成提供了热源和流体。

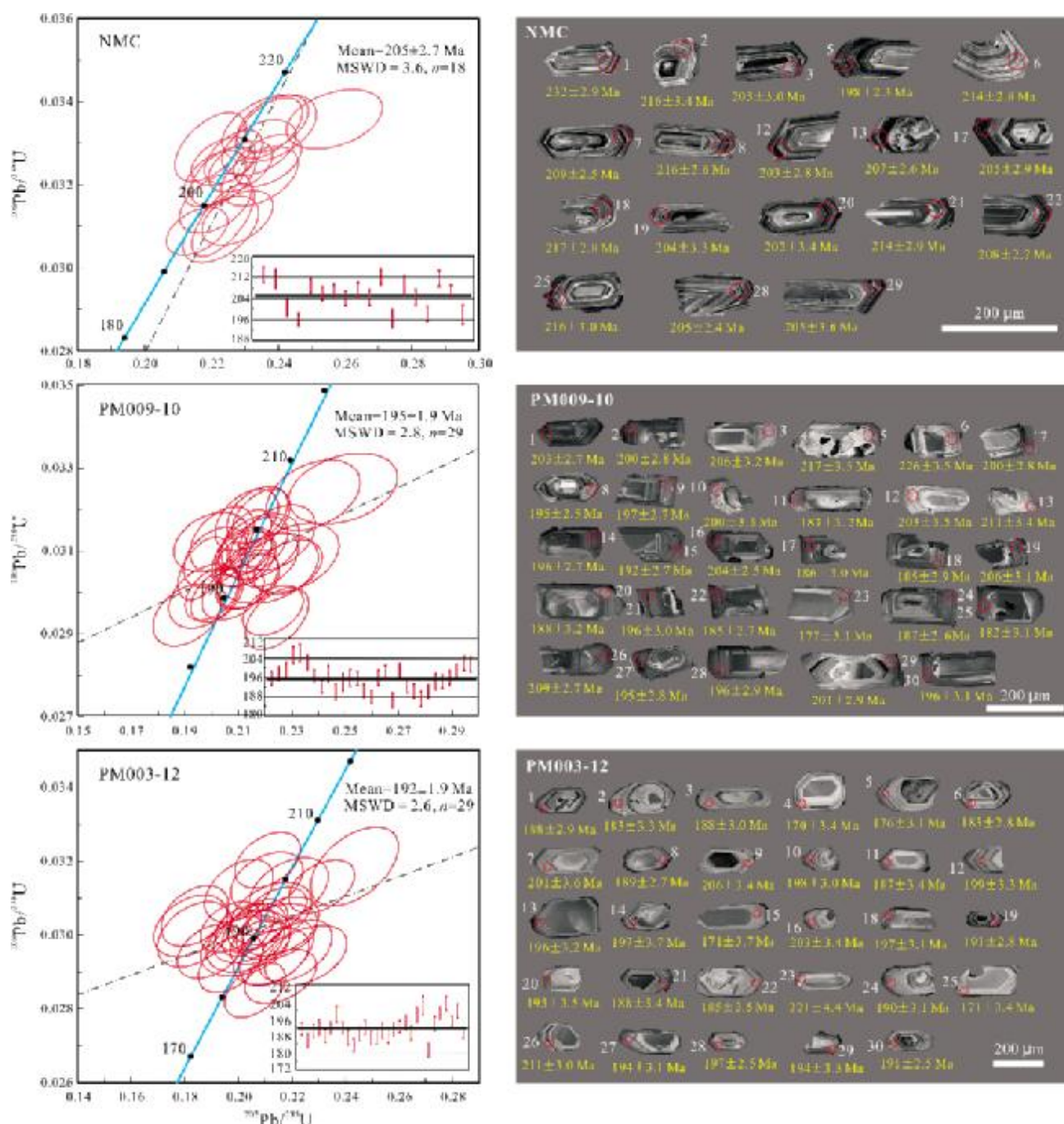


图7 花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图与锆石阴极发光图像

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagram and CL images of granodiorites

4.3 成矿时代

研究区晚三叠世期间处于古亚洲洋闭合后的造山后伸展环境,早侏罗世为古亚洲洋板块俯冲于欧亚大陆下的活动大陆边缘环境,不同构造体系叠加,岩浆热液活动强烈,成矿条件良好^[17-18]。岩浆作用分为3期:晚三叠世(220~205 Ma)、早侏罗世(195~175 Ma)和中侏罗世(170~163 Ma)。吴尚全^[19]对区内二道甸子金矿

的强蚀变岩石中的绢云母采用钾氩法测得年龄 173.25 ± 3.9 Ma 和 195.26 ± 4.48 Ma,判断金成矿时期为海西晚期。本研究3个锑矿床与成矿有关的花岗闪长岩和二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄结果为 205 ± 2.7 Ma、 192 ± 1.9 Ma、 195 ± 1.9 Ma,测年结果符合前人对岩浆活动与成矿作用研究的成果,故矿床成矿时代为晚三叠世—早侏罗世。

4.4 矿床成因

中国有色金属工业总公司地质勘查总局^[20]将中国锑矿床的成因划分为6种类型,即:沉积改造型锑矿床、喷流沉积改造型锑矿床、火山沉积改造型锑矿床、沉积变质再造型锑矿床、岩浆热液充填型锑矿床、表生堆积型锑矿床。赵一鸣等^[21]则将我国锑矿床分为热液层带型、热液脉型、岩浆热液型及砂矿型。陈毓川等^[22]在对我国锑矿成矿规律、矿床成因类型和工业类型等综合研究的基础上,主要依据矿床共性的成矿地质条件与矿产预测要素进行归类划分,将中国锑矿床分为四大预测类型:岩浆热液型、碳酸盐地层中热液型、碎屑岩地层中热液型、火山热液型(包括海相和陆相火山岩)。小兴安岭-张广才岭锑成矿带的矿床多与岩浆岩密切相关,矿化作用多受花岗岩断裂破碎带或火山岩层间构造控制^[23]。

研究区岩浆活动频繁,流体包裹体和同位素研究结果表明,与成矿有关的是晚三叠世花岗闪长岩、早侏罗世花岗闪长岩和早侏罗世二长花岗岩。自中生代以来,本区伸展作用持续演化,伸展造山作用引起地壳减薄,随后深部岩浆上侵,岩浆活动为该区的成矿作用提供了热液及热动力,而且在叠加改造早期构造的基础上,形成了以东西向、北东向为主的次级断裂系统,为成矿元素的活化、再富集提供了通道及赋存空间。含矿热液随着温度、压力降低等物理化学条件的改变,携带成矿物质的能力逐渐降低。晚期大气降水加入,成矿物质在浅成的构造有利部位富集沉淀,形成了辉锑矿、黄铁矿等矿物,最终堆积形成了中-低温浅成岩浆热液型锑矿床。

5 结论

吉林中部锑矿床流体包裹体类型主要为富液两相($L_{H_2O}+V_{H_2O}$)包裹体和纯液相(H_2O)包裹体,另外大秃顶子(金)锑矿发育少量含 $CO_2(L_{CO_2}+V_{CO_2})$ 两相包裹体。均一温度范围121.5~281.5℃,盐度范围3.39%~10.73%,密度范围0.833~0.985 g/cm³,表明成矿流体为中-低温、低盐度、低密度的不饱和流体。

H-O同位素结果显示, $\delta^{18}O$ 变化范围为15.71‰~18.28‰, δD 变化范围为-111.1‰~-83.8‰,在 $\delta^{18}O$ - δD 图中分布比较集中,位于大气降水与岩浆水中间部位,远离大气降水靠近岩浆水。S同位素结果显示,黄铁矿

的 $\delta^{34}S$ 范围在-8.25‰~-3.86‰,辉锑矿的 $\delta^{34}S$ 范围在-8.18‰~-7.67‰, $\delta^{34}S$ 值范围较为集中,具混合硫特征。

侵入岩锆石U-Pb年龄结果为205±2.7 Ma、192±1.9 Ma、195±1.9 Ma,侵入岩结晶年龄为晚三叠世一早侏罗世。

参考文献(References):

- [1]周树亮,王瀛,金京杰,等.吉林中部地区大秃顶子金锑矿区发现中型金矿床的意义[J].吉林地质,2016,35(4):41-45.
Zhou S L, Wang Y, Jin J J, et al. Significance of the discovery of midsize gold deposit in Datudingzi gold-antimony mining area of central region of Jilin Province[J]. Jilin Geology, 2016, 35(4): 41-45.
- [2]赵际新,周阳,荆振刚,等.桦甸市大秃顶子金矿床地质特征及找矿远景[J].吉林地质,2018,37(2):22-29.
Zhao J X, Zhou Y, Jing Z G, et al. Geological features and prospect of Datudingzi gold deposit in Huadian City[J]. Jilin Geology, 2018, 37(2): 22-29.
- [3]李锦铁.中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识[J].地质论评,1998,44(4):339-347.
Li J Y. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas[J]. Geological Review, 1998, 44(4): 339-347.
- [4]张梅生,彭向东,孙晓猛.中国东北区古生代构造古地理格局[J].辽宁地质,1998(2):91-96.
Zhang M S, Peng X D, Sun X M. The Paleozoic tectonic geographical pattern of Northeast China[J]. Liaoning Geology, 1998(2): 91-96.
- [5]吴福元,曹林.东北亚地区的若干重要基础地质问题[J].世界地质,1999,18(2):1-13.
Wu F Y, Cao L. Some important problems of geology in northeastern Asia[J]. World Geology, 1999, 18(2): 1-13.
- [6]张铁安,刘宇奇,高洪岩,等.黑龙江I级成矿单元——成矿域的最新划分[J].地质与资源,2022,31(2):156-164.
Zhang T A, Liu Y Q, Gao H Y, et al. The first-order metallogenic units in Heilongjiang Province: New division of metallogenic domain [J]. Geology and Resources, 2022, 31(2): 156-164.
- [7]王义强,吕建生,杨言辰,等.吉林省二道甸子金矿控矿构造演化特征及控矿作用[J].地质力学学报,1995,1(3):82-88.
Wang Y Q, Lv J S, Yang Y C, et al. Evolution of the ore-controlling structures of Erdaodianzi gold-deposit in Jilin Province[J]. Journal of Geomechanics, 1995, 1(3): 82-88.
- [8]Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions[J]. Economic Geology, 1988, 83(1): 197-202.
- [9]邵洁涟.金矿找矿矿物学[M].武汉:中国地质大学出版社,1988:1-158.
Shao J L. Prospecting mineralogy of gold deposits[M]. Wuhan: China

- University of Geosciences Press, 1988: 1-158. (in Chinese)
- [10]孙丰月, 金巍, 李碧乐. 关于脉状热液金矿床成矿深度的思考[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(S1): 27-30.
- Sun F Y, Jin W, Li B L. The metallogenic depth of vein hydrothermal gold deposits[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30(S1): 27-30. (in Chinese)
- [11]Roedder E. Fluid inclusions[C]//Ribbe P H. Reviews in mineralogy. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1984: 1-644.
- [12]Wilkinson J J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[J]. Lithos, 2001, 55(1/4): 229-272.
- [13]Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(17): 3057-3067.
- [14]卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-487.
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, et al. Fluid inclusion[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-487. (in Chinese)
- [15]Kelly W C, Rye R O. Geologic, fluid inclusion, and stable isotope studies of the tin-tungsten deposits of Panasqueira, Portugal[J]. Economic Geology, 1979, 74(8): 1721-1822.
- [16]Hoefs J. Stable isotope geochemistry[M]. 4th ed. Berlin: Springer, 1997: 1-383.
- [17]张海洪. 辽北-吉中地区中生代岩浆事件及其对区域构造演化的制约[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- Zhang H H. Mesozoic magmatic events in northern Liaoning and central Jilin provinces: Constraints on the regional tectonic evolution [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [18]赵华伟, 李德洪, 臧兴运, 等. 吉中-延边地区燕山期岩浆作用与矿床成矿系列研究[J]. 地质学报, 2020, 94(1): 241-254.
- Zhao H W, Li D H, Zang X Y, et al. A study of magmatism and ore deposit series of Yanshanian magmatism in the central Jilin-Yanbian area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(1): 241-254.
- [19]吴尚全. 吉林省二道甸子金矿床同位素地质学及成矿物质来源研究[J]. 黄金, 1995, 16(8): 5-9.
- Wu S Q. Study on isotopic geology and source of ore-forming materials of Er-dao-dian-zi gold deposit, Jilin Province, China [J]. Gold, 1995, 16(8): 5-9.
- [20]中国有色金属工业总公司地质勘查总局. 中国锑矿地质及矿床实例[M]. 北京: 矿产地质研究所, 1996: 1-224.
- General Administration of Geological Exploration of China Nonferrous Metals Industry Corporation. Geology and examples of antimony deposits in China[M]. Beijing: Beijing Institute of Mineral Geology, 1996: 1-224. (in Chinese)
- [21]赵一鸣, 吴良士, 白鸽, 等. 中国主要金属矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 194-221.
- Zhao Y M, Wu L S, Bai G, et al. Metallogeny of the major metallic ore deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 194-221.
- [22]陈毓川, 王登红, 李厚民, 等. 重要矿产预测类型划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-222.
- Chen Y C, Wang D H, Li H M, et al. Division for prospecting types of important mineral resources in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 194-221. (in Chinese)
- [23]王永磊, 徐珏, 张长青, 等. 中国锑矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2208-2215.
- Wang Y L, Xu J, Zhang C Q, et al. Summary of metallogenic regularities of antimony deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2208-2215.