

铜陵凤凰山矿田成矿时代及成矿物质来源^{*}

王次松¹, 吴才来^{2**}, 郑 坤², 吴 迪³, 单士锋¹, 李 翔¹, 古全德¹

(1 安徽省地质矿产勘查局 321 地质队, 安徽 铜陵 244033; 2 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要 铜陵是长江中下游铁铜金等多金属成矿带上一个重要的矿集区, 凤凰山矿田是铜陵矿集区七大矿田之一, 位于铜陵市东南部, 近东西向铜陵-戴家汇构造-岩浆-成矿带的中部。为了探讨凤凰山矿田的成矿时代、成矿流体特征及其成矿物质来源, 文章对矿田内仙人冲铜矿、清水塘铜矿、铁山头铜矿、金山冲铜矿、龙潭肖铜矿、朱家山铜矿、药园山铜矿开展了 Re-Os 同位素定年以及碳、氧、硫、铅同位素分析。结果表明, 凤凰山矿田成矿时代为 140.9~142.2 Ma, 方解石的碳、氧同位素分析显示凤凰山矿田成矿流体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-4.3\text{‰} \sim +2.9\text{‰}$, 暗示成矿流体中的碳具多来源特征, 部分来自岩浆, 部分来自沉积碳酸盐围岩; 测试样品的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $+10.7\text{‰} \sim +13.2\text{‰}$, 反映成矿流体中的水以岩浆热液为主; 矿田内主要矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+0.2\text{‰} \sim +6.5\text{‰}$, 硫具有岩浆来源特征, 且部分可能来自幔源, 铅同位素也显示了相似的特征。辉钼矿样品中的 $w(\text{Re})$ 为 $47.1 \times 10^{-6} \sim 103.2 \times 10^{-6}$, 显示出壳幔混合源的特征。

关键词 地球化学; 成矿时代; 成矿物质来源; 凤凰山矿田; 安徽铜陵
中图分类号: P618.42 **文献标志码**: A

Ore-forming ages and sources of metallogenic materials of Fenghuangshan ore field in Tongling

WANG CiSong¹, WU CaiLai², ZHENG Kun², WU Di³, SHAN ShiFeng¹, LI Xiang¹ and GU QuanDe¹

(1 321 Geology Party, Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration of Anhui Province, Tongling 2440331, Anhui, China;

2 Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of MNR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing

100037, China; 3 Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract

Tongling is an important ore cluster in the Middle-Lower Yangtze River Fe-Cu-Au-polymetallic metallogenic belt. Fenghuangshan is one of the seven ore fields in Tongling area. It is located in the southeast of Tongling City, and in the middle part of Tongling-Daijiahui tectonic-magmatic-metallogenic belt. Re-Os isotopic dating and C, O, S, Pb isotope geochemistry were analyzed in this paper in order to discuss the ore-forming ages, characteristics of the ore fluid and sources of the ore-forming materials. The results show that the ore-forming ages of the Fenghuangshan ore field are between 140.9 Ma and 142.2 Ma. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ values of the ore-forming fluid are from -4.3‰ to $+2.9\text{‰}$. It is suggested that the carbon in the ore-forming fluid has the feature of multi-source, which is from magma and the surrounding carbonate rock. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ values of the samples rang from $+10.7\text{‰}$ to $+13.2\text{‰}$, implying that the magmatic fluid is dominant in the ore fluid. The $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfides vary from $+0.2\text{‰}$ to $+6.5\text{‰}$, indicating that most of the sulfur in the ore fluid was derived from the magma, partly probably from the mantle.

^{*} 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41472063)的资助

第一作者简介 王次松,男,1966年生,高级工程师,主要从事地质矿产勘查及研究工作。Email: wcisong@126.com

^{**} 通讯作者 吴才来,男,1960年生,ORCID: 0000-0001-8933-7010。Email: wucailai@126.com

收稿日期 2017-07-20;改回日期 2018-06-04。张绮玲编辑。

The characteristics of the lead isotope are similar to those of the sulfur isotope. $w(\text{Re})$ in the molybdenite range from 47.1×10^{-6} to 103.2×10^{-6} , revealing the characteristics of crust-mantle mixed sources.

Key words: geochemistry, ore-forming age, the source of ore-forming material, Fenghuangshan ore field, Tongling in Anhui Province

铜陵位于安徽省中南部的长江南岸,是长江中下游铁铜金等多金属成矿带上的一个重要矿集区,区内大规模成矿作用与中生代中酸性侵入岩有着密切的成因联系。吴才来等(2013)将铜陵地区侵入岩划分为橄榄安粗岩系列和高钾钙碱性系列,前者约占全区侵入岩的20%,与金矿成矿关系密切;后者约占全区侵入岩的80%,与铜矿成矿关系密切(Wu et al., 2014; 2017)。凤凰山矿田位于铜陵市的东北部,区内出露铜陵地区规模最大的凤凰山岩体,围绕凤凰山岩体产出多个铜(钼、金、铁、铅锌等)矿床,前人已对矿田内各单个矿床开展了一些研究(毛政利等, 2004; 毛景文等, 2004; 赖健清等, 2006; 瞿泓滢等, 2010a; 2010b; 2011),但没有从整体上把各个矿床作为一个成矿系统开展研究,同时缺少对成矿系统与岩浆活动之间关系的研究。为了从成矿系统和岩浆活动之间关系的角度对凤凰山矿田开展综合研究,本文利用Re-Os同位素定年及碳、氧、硫、铅同位素分析,对凤凰山矿田内多个矿床的成矿时代、成矿物质来源和构造背景等进行了系统的研究,讨论了该矿田的成矿机理,并为下一步找矿勘查提供理论支撑。

1 矿田地质背景

铜陵地区是长江中下游多金属成矿带上的一个重要矿集区,大地构造位置处于扬子板块与华北板块的结合部位,扬子板块的北缘。区内经历了活动—稳定—再活动的地质演化历史。前南华纪为基底发育阶段,寒武纪至中三叠世为盖层沉积阶段,是一个相对稳定的时期,形成了巨厚的沉积盖层;印支期—燕山期强烈的构造运动使早期形成的沉积盖层发生褶皱隆起,并伴有断裂凹陷。区内主要出露志留系—三叠系浅海相碳酸盐岩及少量的半深海相硅质岩和海陆交互相的碎屑岩,是Cu-Au-Fe多金属矿床的围岩,其中石炭系碳酸盐岩、二叠系石灰岩和黑色页岩以及三叠系碳酸盐岩和泥岩与区域成矿关系密切,部分构成了初始矿源层。至燕山期,强烈的构造-岩浆活动对初始矿源层进行了叠加和改造,最终形成

该矿集区各矿田及其矿床(点)的分布格局(谢建成等, 2008)。

铜陵地区分布着大小70多个中酸性侵入岩体,多位于宽约25 km的铜陵-戴家汇构造-岩浆成矿带上(图1b)(常印佛等, 1991, 吴才来等, 2003),呈近东西向串珠状排列,控制着铜官山、狮子山、焦冲、新桥、舒家店、凤凰山、沙滩脚等主要铜-金多金属矿田。这些侵入岩主要分为高钾钙碱性和橄榄安粗岩2个系列,前者主要由辉长闪长岩、石英二长闪长(玢)岩、花岗闪长(斑)岩,与区内的铜等多金属成矿关系密切;后者主要为辉石二长闪长岩、二长闪长岩、石英二长岩,与区内的金等多金属成矿关系密切(吴才来等, 2003; Wu et al., 2014; 2017)。部分侵入岩接触带或附近形成了矽卡岩型、层控矽卡岩型铜(金)矿床,少部分岩体发育斑岩型铜矿化(常印佛等, 1983)。

凤凰山矿田位于铜陵市的东北部,矿区内主要出露的岩体为凤凰山岩体,该岩体是铜陵地区出露面积最大的岩体,产于新屋里复向斜南西端近核部,由花岗闪长岩和石英二长闪长岩组成,其围岩为泥盆系上统至三叠系的碳酸盐岩,以三叠系灰岩为主(图1)。岩体与围岩的接触带变质作用强烈,围绕岩体形成宽0.5~1.4 km的变质晕圈,主要为大理岩化、少量角岩化,内侧断续发育矽卡岩带,宽0~30 m。各矿床分布于岩体周围,多沿着岩体接触带产出,构成了凤凰山矿田,主要赋矿层位为南陵湖组(T_{1n}),其次为二叠系孤峰组(P_{1g})和栖霞组(P_{1q})碳酸盐岩。

2 各矿床简要地质特征

凤凰山岩体周围及其附近分布有药园山铜矿、仙人冲铜矿、铁山头铜矿、龙潭肖铜矿、清水塘铜矿、朱家山铜矿等多个金属矿床,各矿床的主要地质特征简述如下。

2.1 仙人冲铜矿

位于凤凰山岩体南东接触带(图2)。出露地层主要为三叠系下统南陵湖组和中统东马鞍山组及月

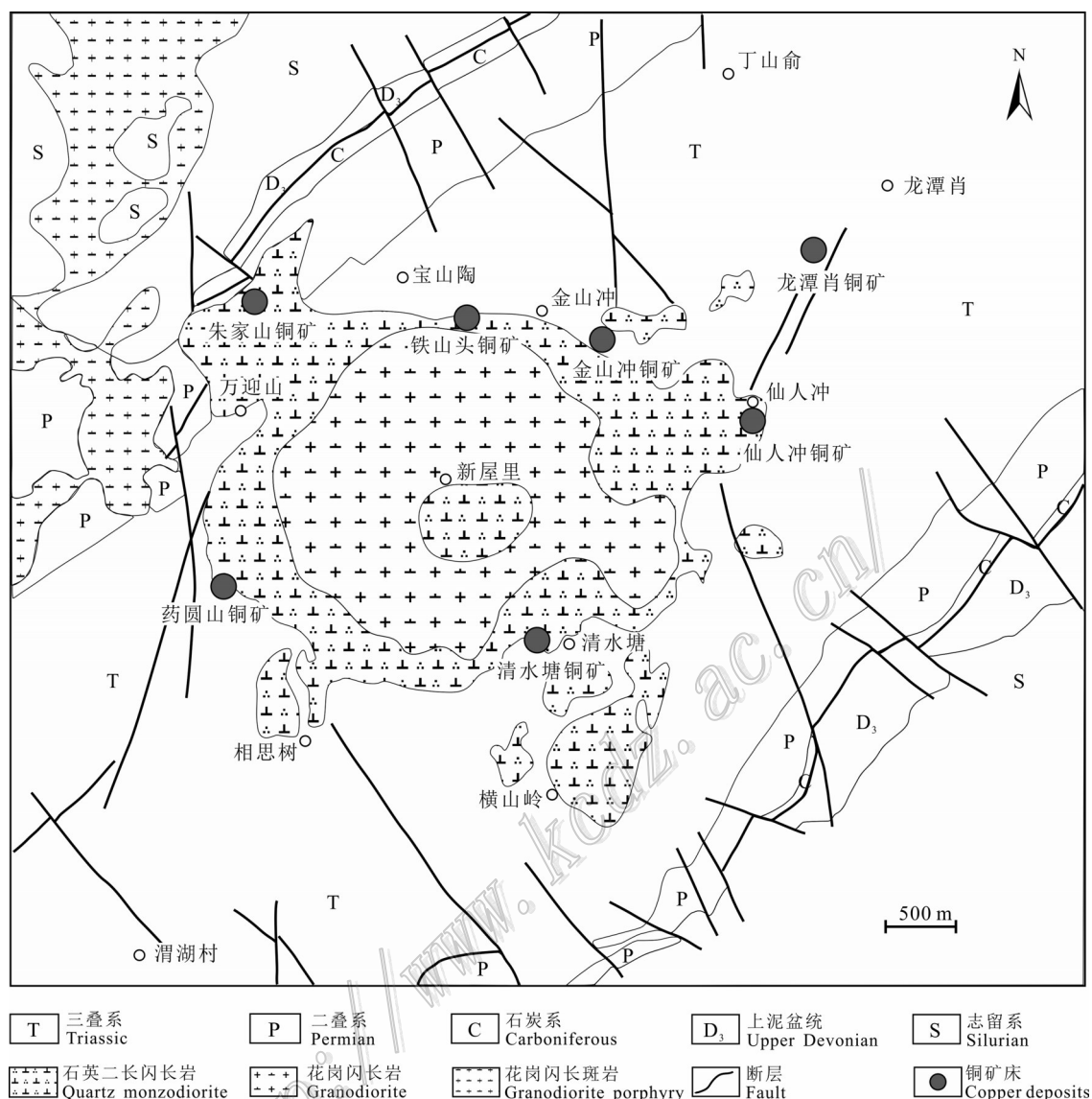


图1 凤凰山矿田岩体及矿床分布示意图

Fig. 1 Geological sketch map of intrusive rock and ore deposit distribution in the Fenghuangshan ore field

山组碳酸盐岩,矿体受凤凰山岩体与南陵湖组接触带及层间裂隙控制。主矿体有Ⅰ、Ⅱ号2个,小矿体27个。

Ⅰ号矿体为似板状,沿走向有膨胀收缩现象,平面上呈弧形展布,长约1100 m,平均厚度7.9 m,斜深298 m,倾角60°~70°,局部80°(图3)。Ⅱ号矿体呈不规则透镜状,走向NE~SW,倾向SE,倾角45°~65°,局部70°,长300 m,平均厚7.5 m,斜深298 m(图3)。Ⅰ号矿体铜平均品位0.76%,Ⅱ号矿体铜平均品位0.86%。

矿床成因类型:接触交代矽卡岩型。

2.2 清水塘铜矿

位于凤凰山岩体南接触带,赋矿围岩为三叠系下统南陵湖组上段厚层大理岩、中统东马鞍山组大理岩夹白云质大理岩(图4)。矿体受侵入接触构造、捕虏体构造控制,地表为氧化矿,出露铁帽,深部为原生矿。矿体呈透镜状,倾向上具上宽下窄特点。Ⅰ号主矿体长约270 m,地表出露铁帽平均垂深约10 m,矿体厚度1.15~13.7 m,平均厚度8.43 m;矿体走向北东,倾向南东,倾角30°~45°(图6)。Ⅱ号主矿体长164 m,矿体厚度6~10 m,平均厚度9 m,地表铁帽平均垂深3 m左右,矿体走向近南北向,倾向

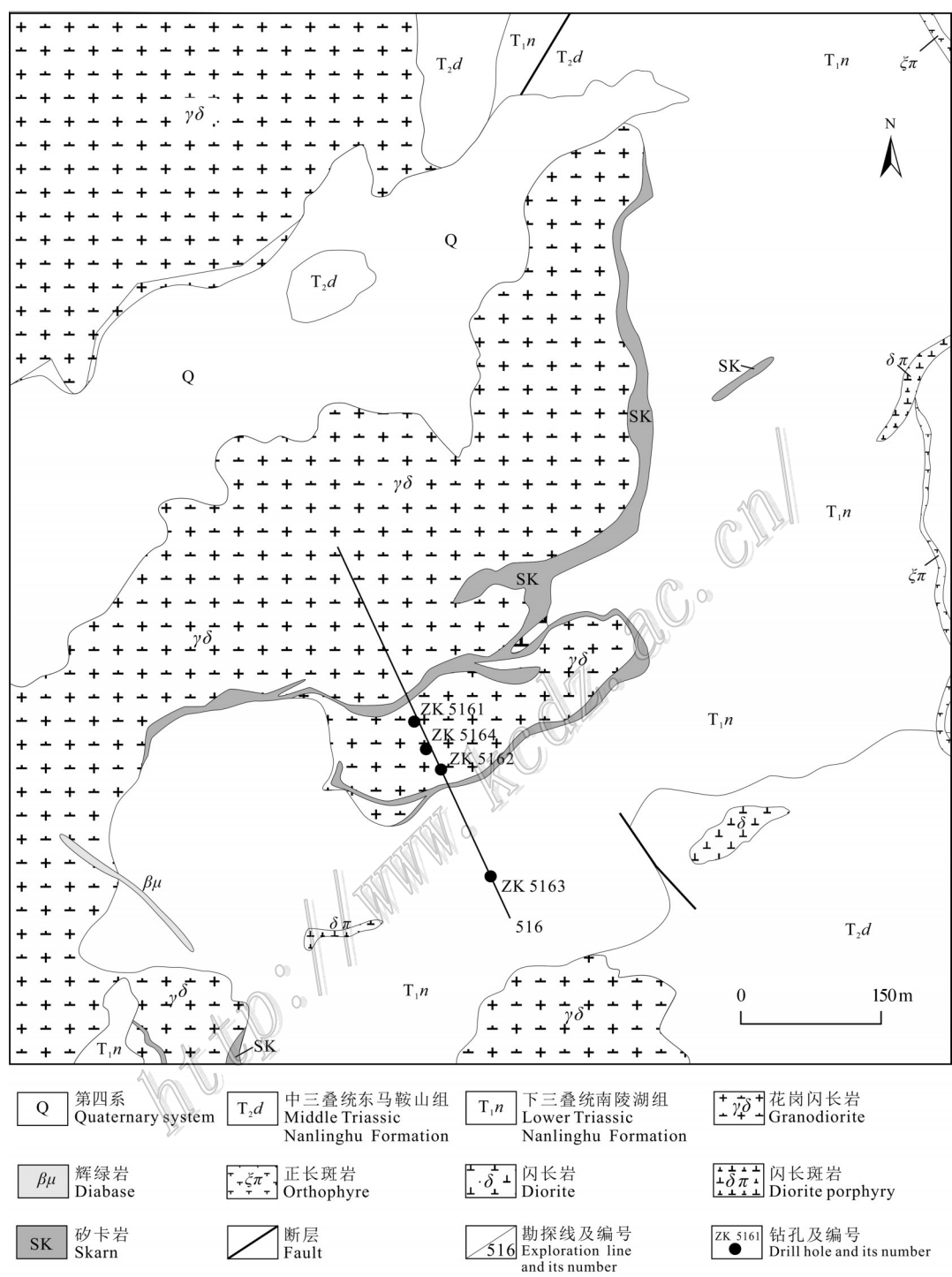


图2 凤凰山矿田仙人冲矿区地质图

Fig. 2 Geological sketch map of the Xianrenchong ore district in the Fenghuangshan ore field

东,倾角60°~70°(图5)。

矿石自然类型主要为含铜矽卡岩,其次为含铜矽卡岩化花岗闪长岩和含铜矽卡岩化大理岩。全矿床铜平均品位为1.03%,伴生金、银、硫、铁

矿产。

矿床成因类型:接触交代矽卡岩型。

2.3 铁山头铜矿

位于凤凰山岩体北接触带,赋矿围岩为三叠系

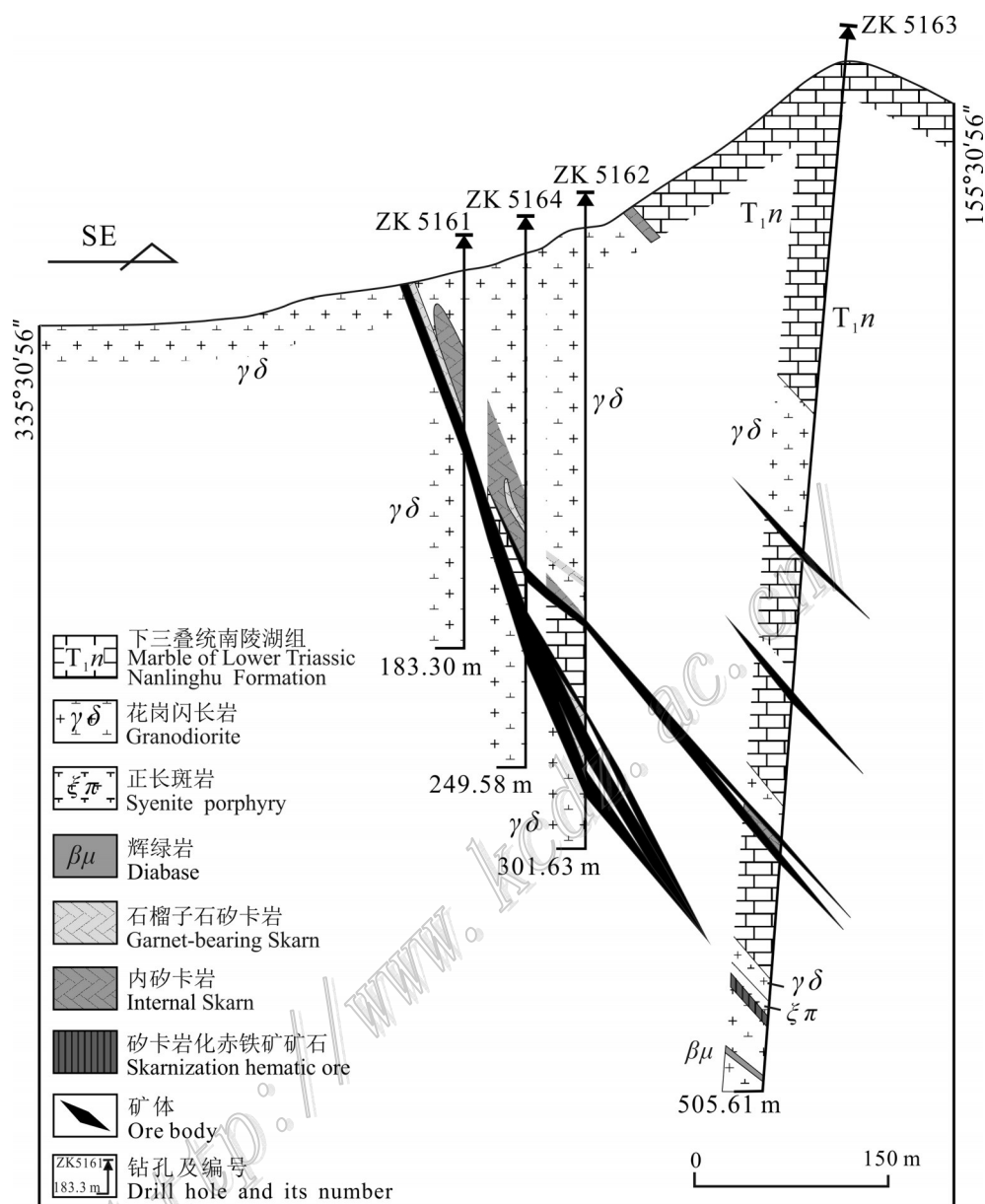


图3 凤凰山矿田仙人冲铜矿516线地质剖面图

Fig. 3 Geological section along No.516 line of the Xianrenchong Cu deposit in the Fenghuangshang ore field

下统南陵湖组和龙山组灰岩(图6、7)。主矿体受接触带控制,呈似板状,平面上呈近东西向弧形展布。次要矿体、小矿体赋存于接触带附近的矽卡岩、大理岩与石英二长闪长岩裂隙中,矿体产状与所在部位主矿体一致。

主矿体2个(I、II号),次要矿体1个(III号),小矿体21个。I号矿体长167 m,平均厚10.78 m,平均斜深261 m;II号矿体长167 m,平均厚3.47 m,平均斜深30 m;III号矿体长48 m,平均厚10.80 m(图7)。矿体自然类型主要为含铜矽卡岩及含铜磁铁矿。全矿床铜平

均品位0.73%。

矿床成因类型:接触交代矽卡岩型。

2.4 龙潭肖铜矿

位于凤凰山岩体东北部的凤凰山向斜中(图8),矿体受隐爆角砾岩筒控制,主要赋存在角砾岩筒边部及外侧的白云质灰质砾岩中(图9)。矿床围岩主要为三叠系中统月山组碳酸盐岩,地表出露桥头杨花岗闪长斑岩脉。

矿体28个,其中:铜矿体19个(主矿体4个:I、II、III、IV号,小矿体15个)、铅锌矿体4个(主矿体1

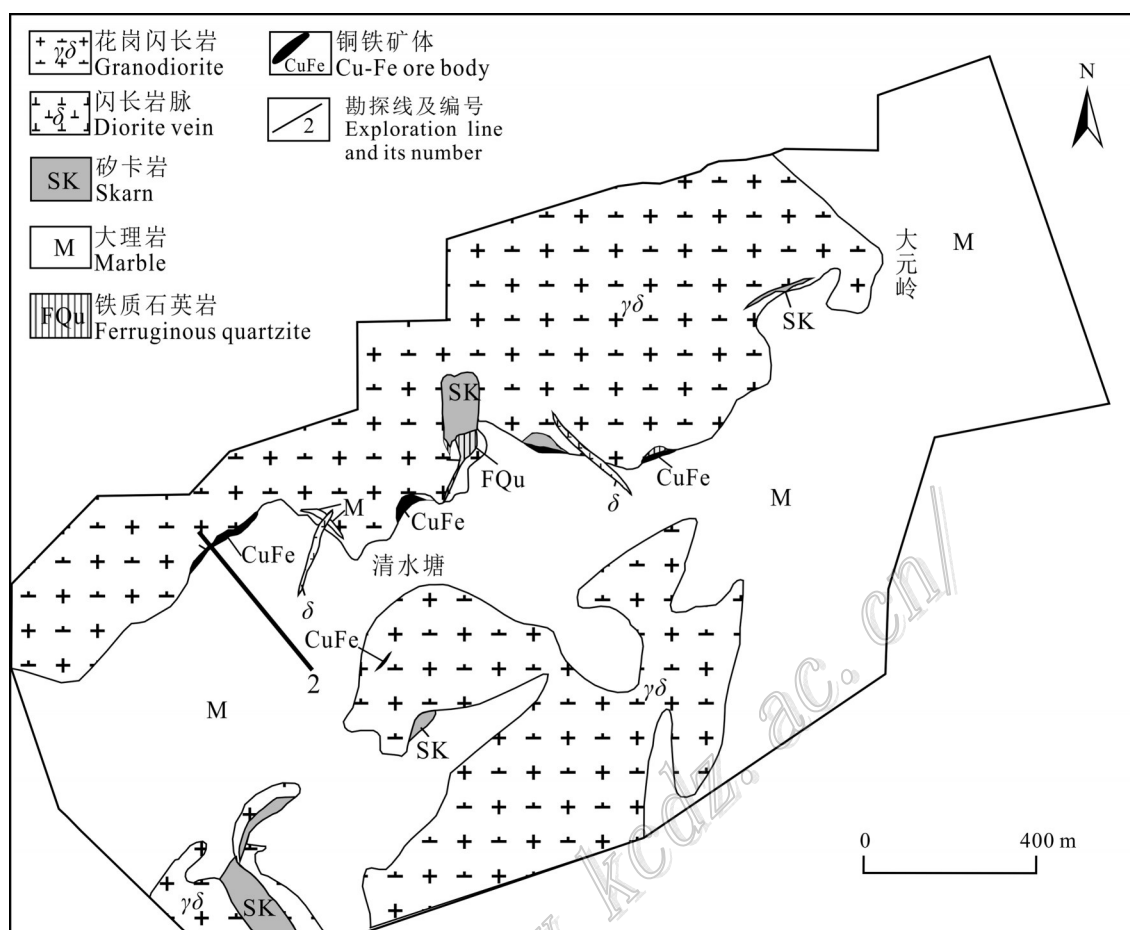


图4 凤凰山矿田清水塘平面地质图

Fig.4 Geological sketch map of the Qingshitang ore district in the Fenghuangshan ore field

个: V号,小矿体3个)、铜铅小矿体1个、铜锌小矿体2个、铜铅锌小矿体2个,匀呈不规则透镜体。

I号矿体走向长140 m,真厚度4.42 m,斜深155 m,走向近SN,倾向95°,倾角80°。

II号矿体走向长140 m,真厚度3.48 m,斜深约50 m。III号矿体走向长约50 m,真厚度约1 m,斜深约25 m,走向近SN,倾向282°,倾角65°。IV号走向长50 m,真厚度6.7 m,斜深50 m。V号走向长40 m,真厚度3 m,斜深约25 m。

矿石自然类型:含铜复杂砾岩、含铜石灰质砾岩、含铜铅锌石灰质砾岩、含铜铅锌复杂砾岩、含铜锌石灰质砾岩、含铅锌白云质石灰质砾岩、含铜锌复杂砾岩、含铜铅锌白云质石灰质砾岩。铜品位一般0.30%~0.73%,最高3.98%;铅品位0.82%~1.79%,最高4.00%;锌品位1.36%~2.36%,最高5.15%。

矿床成因类型:中低温热液充填交代型(隐爆

角砾岩型)。

2.5 药园山铜矿

位于凤凰山岩体西部及西北部接触带,受北北西及近南北向断裂与岩体接触带构造复合控制(图10)。主要矿体赋存于花岗闪长岩与三叠系下统碳酸盐岩接触带,次要矿体、小矿体多分布于主矿体近旁的大理岩、矽卡岩、花岗闪长岩中。

目前查明矿体计108个,主矿体4个: I、II、III、IV号。主矿体由于受凤凰山断裂带多期次活动的影响,晚期的正长斑岩、辉绿岩等岩脉贯入,将先期形成的完整矿体切割或错位成“四分五裂”,构成现已圈定的I、II、III、IV号矿体。I、III、IV号矿体在地表及浅部断续相连,II、IV号矿体在深部归并相连,主矿体在深部归为II号矿体。

主要矿体多呈不规则透镜状、板状,浅部矿体厚大,深部渐变成薄板状,多分枝复合、尖灭再现。走

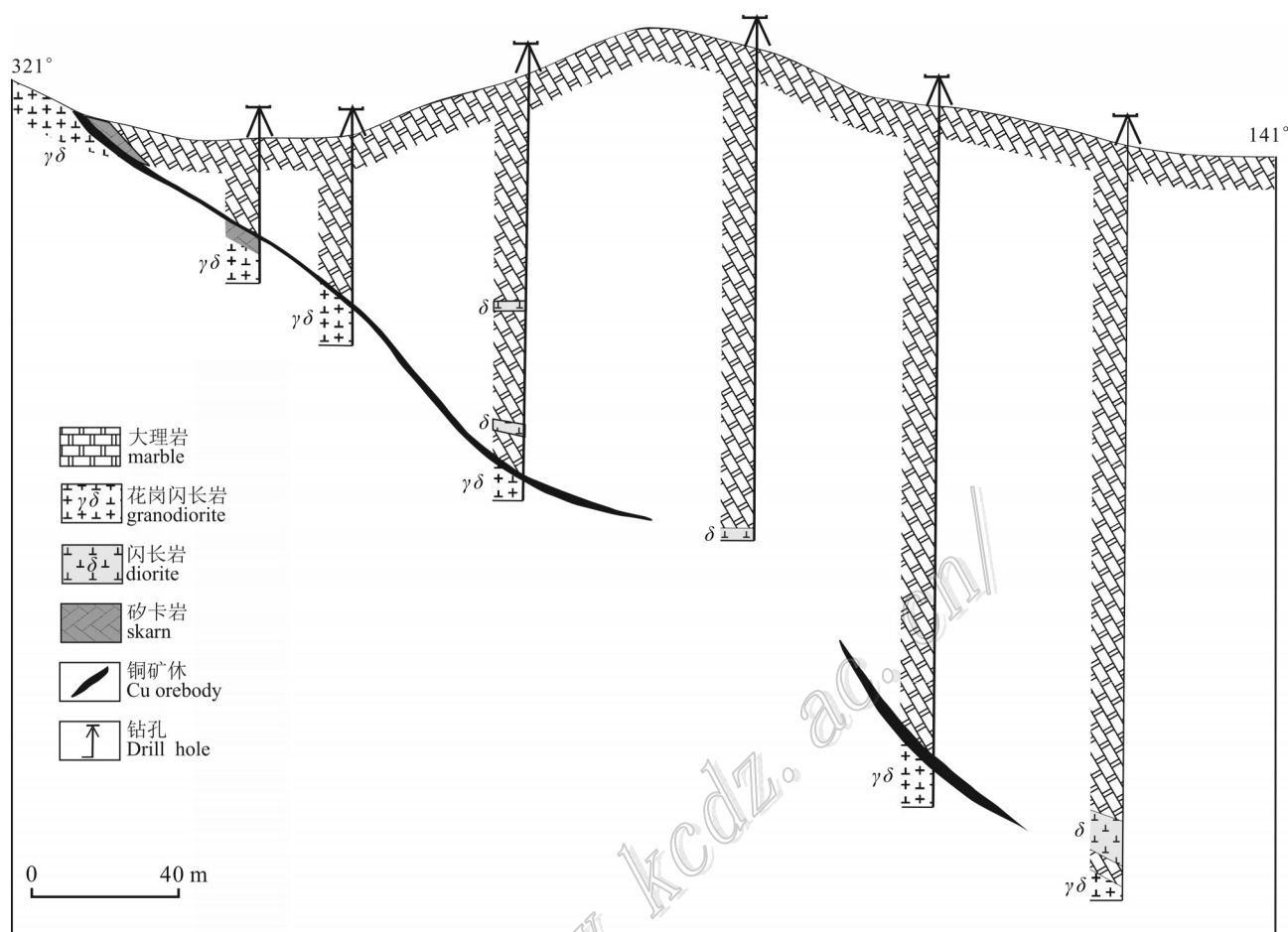


图5 凤凰山矿田清水塘铜矿2线地质剖面图

Fig. 5 Geological section along No.2 line of the Qingshitang Cu deposit in the Fenghuangshang ore field

向近南北,倾向不定,多变化,总体与接触面倾向一致。矿床北段浅部外倾(围岩),深部内倾(岩体);矿床南段浅部内倾,局部超覆,深部外倾,呈不规则的“麻花状”。由浅到深倾角变化为 $70^{\circ} \rightarrow 90^{\circ} \rightarrow 60^{\circ}$,呈由缓变陡再变缓趋势(图11)。

矿体走向长282~1000 m,平均斜长128~976 m,平均厚度为8.9~35.2 m,赋存标高+139~898 m。

矿石工业类型主要为铜矿石,次为铁铜矿石。自然类型主要为含铜矽卡岩,次为含铜磁铁矿、含铜黄铁矿、含铜花岗闪长岩、含铜大理岩、含铜角砾岩,局部为含铜铅锌硫矽卡岩、含铜钨矽卡岩、含铜锌矽卡岩。

全矿床、I、II、III、IV号矿体铜平均品位分别为1.26%、1.38%、1.74%、0.76%、0.58%。I、II、III、IV号矿体:铁平均品位17.28%~36.61%,伴生硫平均品位4.58%~8.77%。

矿床成因类型为接触交代矽卡岩型。

2.6 朱家山铜矿

位于凤凰山岩体北西接触带,围岩主要为二叠系栖霞组及孤峰组(图12)。矿体受捕虏体接触带构造及其旁侧岩体、围岩中裂隙构造的控制。

主铜矿体走向长526.00 m,斜深最大82~340 m,平均187.80 m;矿体呈似层状陡倾斜产出,走向近南北向,倾向西,倾角为 $75^{\circ} \sim 88^{\circ}$ (图13)。矿石自然类型为含铜矽卡岩型、少量含铜矽卡岩化花岗闪长岩、含铜黄铁矿。全矿床铜平均品位1.36%,伴生金、银、锌、硫矿产。矿床成因类型:接触交代矽卡岩型。

3 分析测试方法

本文共采集9件硫化物矿石样品,分别来自仙人冲铜矿1件(XRC)、清水塘铜矿1件(QST)、铁山头铜矿2件(TST-1、2)、金山冲铜矿1件(JSC)、龙潭

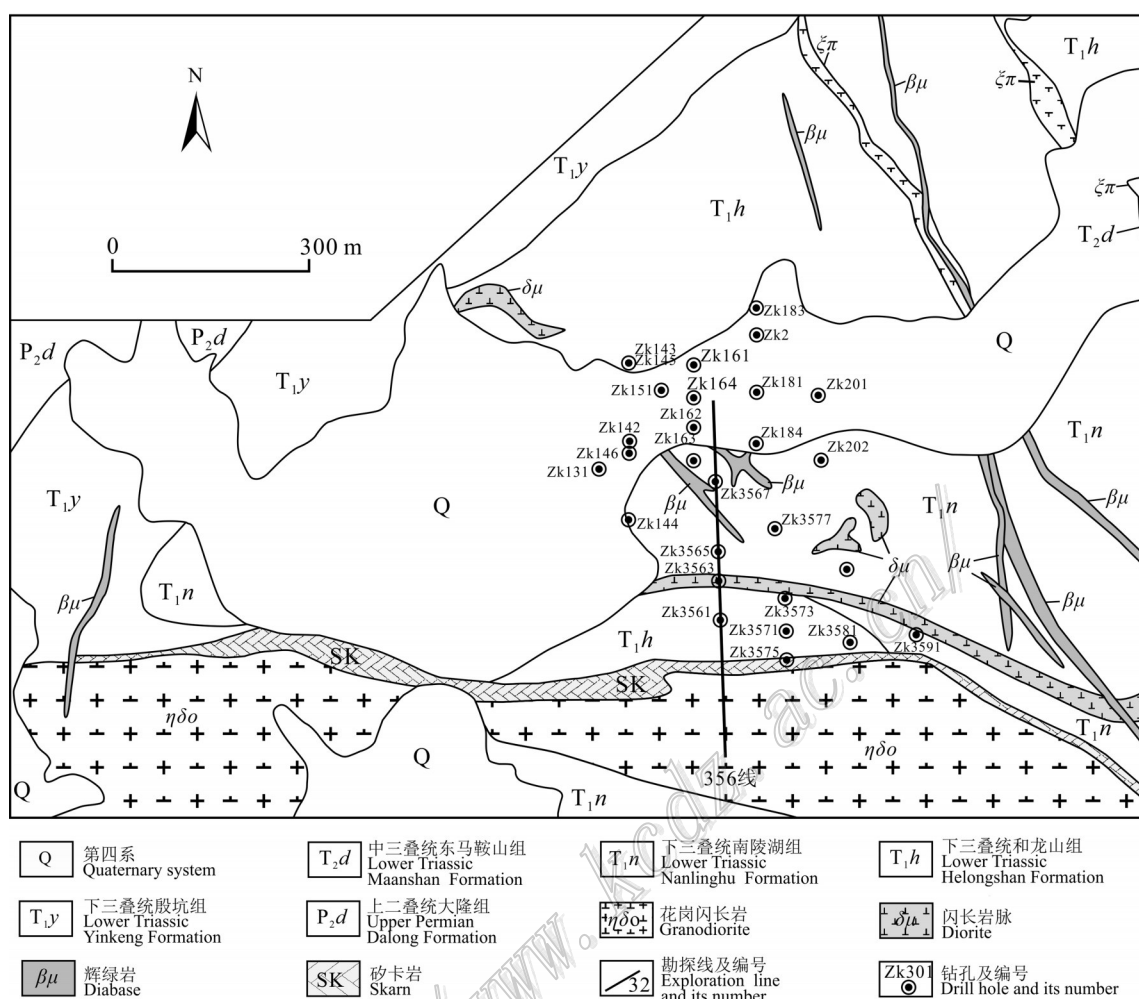


图6 凤凰山矿田铁山头矿区地质简图

Fig. 6 Geological sketch map of the Tieshantou ore district in the Fenghuangshan ore field

肖铜1件(LTX)、朱家山铜矿1件(ZJS)、药园山铜矿2件(YYS-1,2),具体取样位置分别列于表1、2、3、4中。样品由河北廊坊诚信地质服务公司经无污染粉碎、分离、电磁分离,然后在双目镜下分别挑选出纯度大于99%的辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方解石,再分别用玛瑙研钵磨至200目以下,然后上仪器分析测试,具体测试方法如下。

3.1 Re-Os同位素测年

样品分析和测试在国家地质实验测试中心Re-Os同位素实验室进行,采用美国TJA公司生产的电感耦合等离子体质谱仪TJAX-series ICP-MS测定同位素比值。对于Re-Os含量很低的样品采用美国热电公司(Thermo Fisher Scientific)生产的高分辨电感耦合等离子体质谱仪HR-ICP-MS Element 2进行测量,整

个实验过程主要包括分解样品、蒸馏分离钨、萃取分离铼、质谱测定4个步骤。本次实验全流程空白水平远低于所测样品中的铼、钨含量,因此不会影响实验中铼、钨含量的准确测定。实验采用国家标准物质GBW04436(JDC)为标样,给出的模式年龄分别为 $(141.1 \pm 2.1)\text{Ma}$ 和 $(139.3 \pm 2.0)\text{Ma}$ 。空白样 $w(\text{Re})$ 为0.0029 ng和0.0040 ng, $w(\text{Os})$ 为0.0001 ng和0.0004 ng。模式年龄计算采用公式 $t = \ln(1 + {}^{187}\text{Os}/{}^{187}\text{Re})/\lambda$,其中 $\lambda({}^{187}\text{Re} \text{ 衰变常数}) = 1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Smoliar et al., 1996)。加权平均年龄计算及谐和图绘制采用ISO-PLOT(3.00版)软件(Ludwig, 2003)完成。

3.2 碳、氧同位素分析

方解石样品的碳、氧同位素测试由核工业北京地质研究院分析检测研究中心同位素分析室完成,

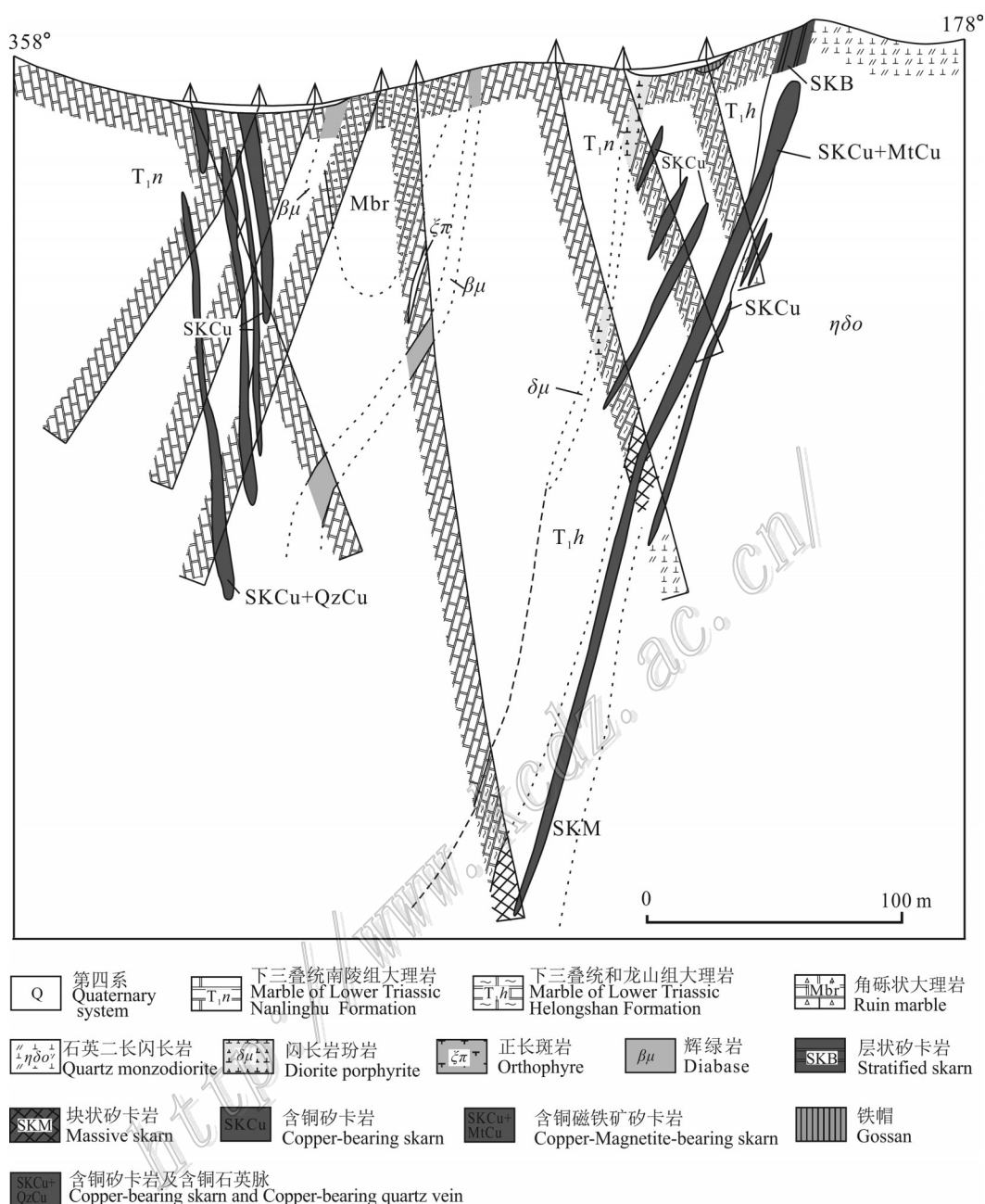


图 7 凤凰山矿田铁山头 356 线地质剖面图

Fig. 7 Geological section along No.365 line of the Tieshantou Cu deposit in the Fenghuangshang ore field

测试方法如下:将研磨好的方解石样品放入烘箱 105℃ 温度烘烤样品 2 小时,去除吸附水。在 75℃ 下烘烤在 Gasbench 线制样设备的样品管,烘干后将 0.1 mg 左右样品放入样品管中并封盖。用高纯氦气将样品管中的空气排出。用酸泵酸针向样品管中加过量的 100% 磷酸。磷酸与碳酸盐样品反应产生 CO₂ 气体。用高纯氦气将生成的 CO₂

气体带入 MAT253 质谱仪测试 C、O 同位素组成。每 5 个样品加入一个标准,用参考气对其比对测试,测量结果以 PDB 为标准,记为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$,其精度分别优于 $\pm 0.1\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$ 。碳酸盐样品的标准为 GB04416,其 $\delta^{13}\text{C} = 1.61\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -11.59\text{‰} \pm 0.11\text{‰}$; GB04417,其 $\delta^{13}\text{C} = -6.06\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -24.12\text{‰} \pm 0.19\text{‰}$ 。

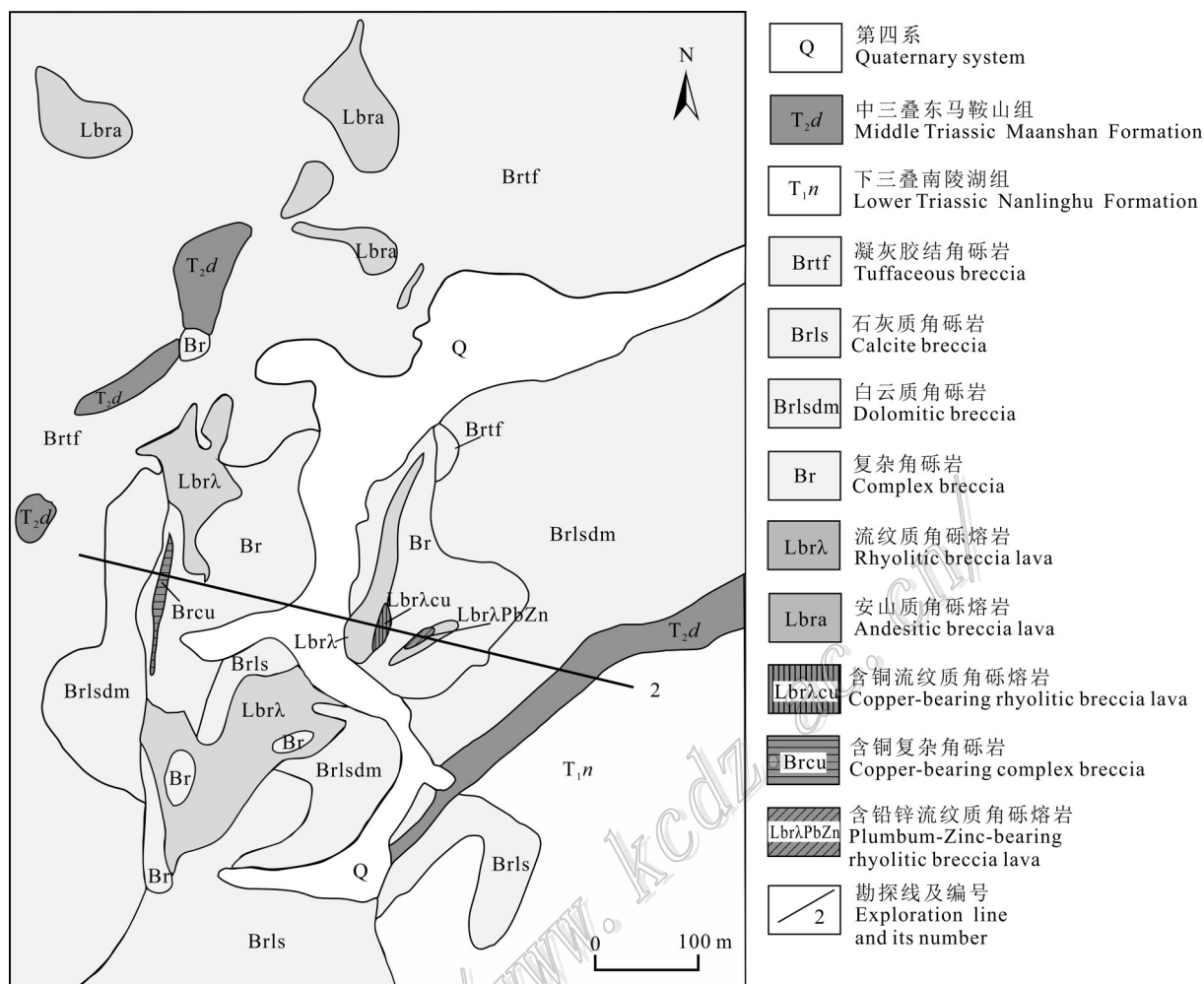


图8 凤凰山矿田龙潭肖矿区地质图

Fig.8 Geological sketch map of the Longtanxiao ore district in the Fenghuangshan ore field

3.3 硫、铅同位素分析

硫化物单矿物样品的硫和铅同位素测试均由核工业北京地质研究院分析检测研究中心同位素分析室完成。硫同位素测试流程如下:将硫化物单矿物和氧化亚铜按一定比例(视不同的矿物反应完全而定)研磨至200目左右,并混合均匀,在真空达 2.0×10^{-2} Pa状态下加热,进行氧化反应,反应温度为980℃,生成二氧化硫气体。真空条件下,用冷冻法收集二氧化硫气体,并用DeltaVPlus气体同位素质谱分析硫同位素组成。测量结果以CDT为标准,记为 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 。

铅同位素测试流程:称取适量样品放入聚四氟乙烯坩埚中,加入纯化的HF+HNO₃酸完全溶解样品,溶解后的样品使用强碱性阴离子交换树脂,依次

加入纯化的HBr和HCl酸对铅进行分离,最后由ISOPROBE-T热电离质谱仪完成铅同位素比值的测定,检测方法和依据为GB/T17672-1999《岩石中铅锶钨同位素测定方法》。

4 分析结果

4.1 辉钼矿Re-Os测年

本文对仙人冲铜矿床、清水塘铜矿床的2件辉钼矿样品进行了Re-Os同位素年龄测试,测试结果见表1。其中样品XRC(仙人冲矿床)中 $w(\text{Re})$ 为 47.11×10^{-6} ,其模式年龄为 (140.9 ± 2.2) Ma,样品FHS-14(清水塘矿床)中 $w(\text{Re})$ 较高,为 103.2×10^{-6} ,模式年龄为 (142.2 ± 2.0) Ma,分别代表2个矿床的成矿年龄。

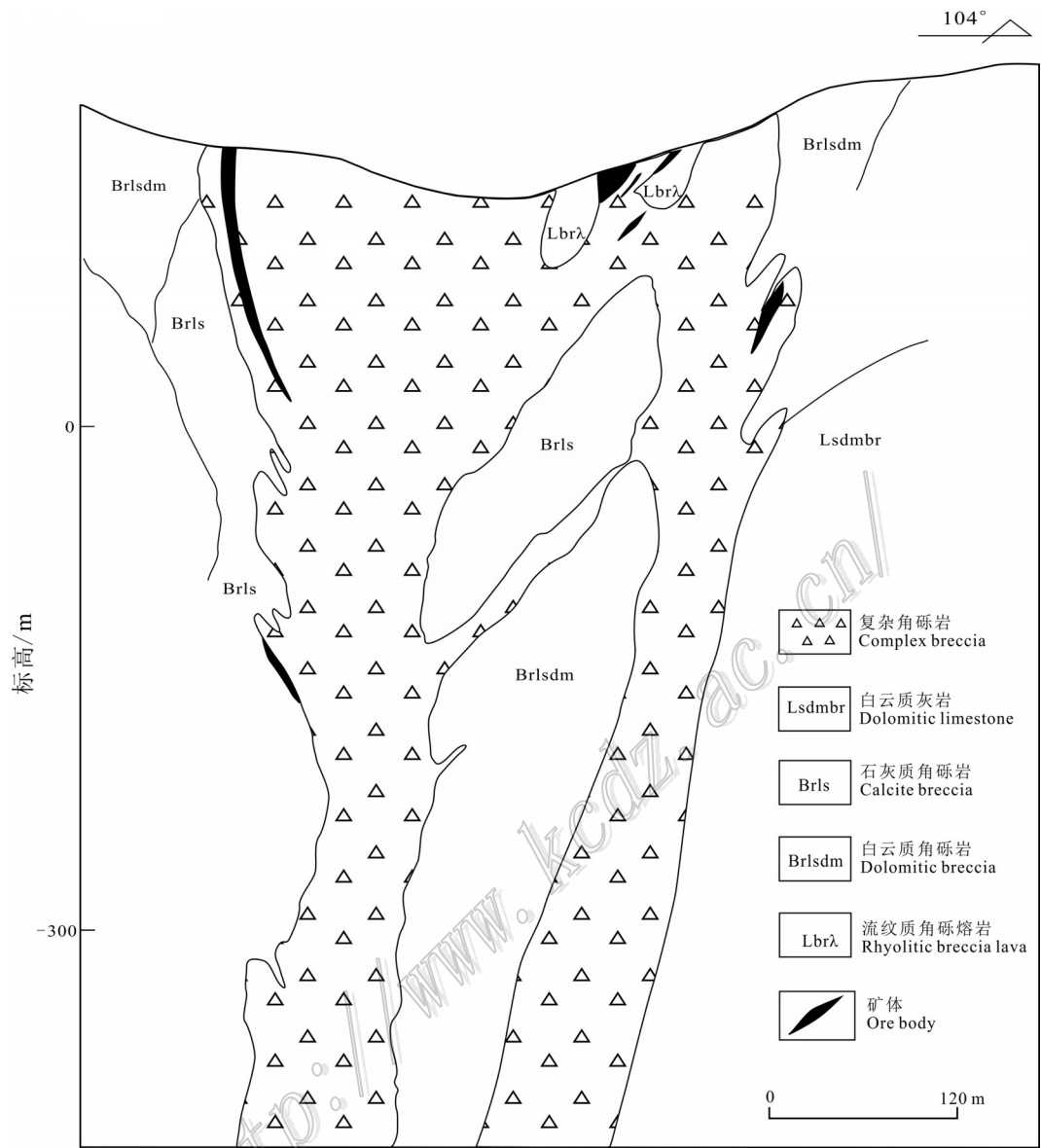


图9 凤凰山矿田龙潭肖矿床2线地质剖岩图

Fig. 9 Geological section along No.2 line of the Longtanxiao Cu deposit in the Fenghuangshang ore field

4.2 碳、氧同位素

本文对采自铁山头铜矿床、金山冲铜矿床和龙潭肖铜矿床的石英-硫化物阶段的3件方解石样品进

行了碳、氧同位素测试,所选样品中均未发现石墨等含碳物质,因此,本次实验测试得到的热液方解石的碳同位素组成可以代表成矿热液碳同位素组成,具

表 1 凤凰山矿田辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测试结果

Table 1 Re-Os isotopic age dating of molybdenite in the Fenghuangshan ore field

矿床	样号	m/g	$w(\text{Re})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$		$w(^{187}\text{Re})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$		$w(^{187}\text{Os})/(\text{ng}\cdot\text{g}^{-1})$		模式年龄/Ma		取样位置
			测定值	误差	测定值	误差	测定值	误差	测定值	误差	
仙人冲	XRC	0.00114	47.11	0.34	29.61	0.21	69.61	0.68	140.9	2.2	-110 m中段I号矿体
药园山	FHS-14	0.00103	103.20	0.68	64.86	0.43	153.9	1.1	142.2	2.0	-440 m中段CM37II号矿体

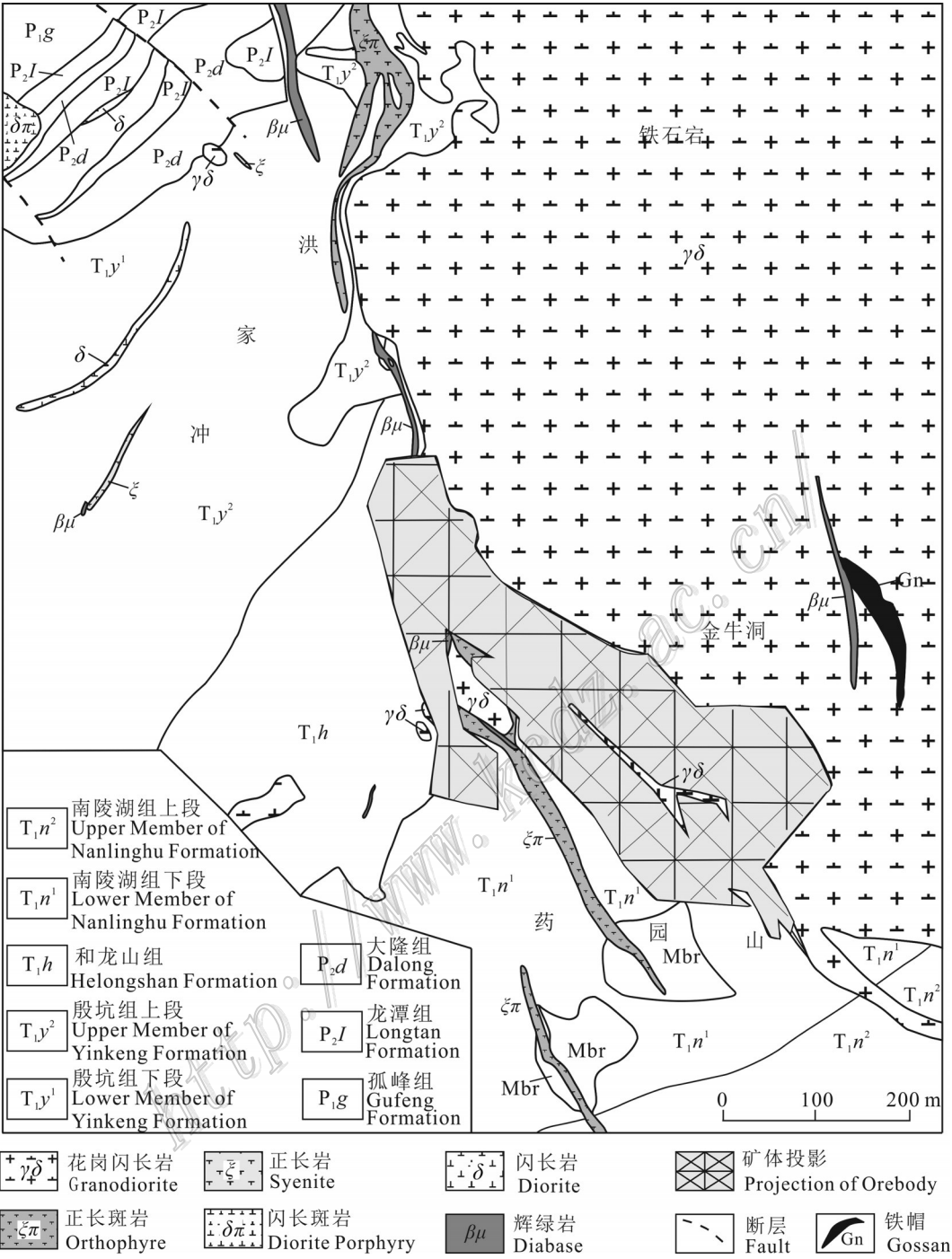


图 10 凤凰山矿田药园山矿区地质图
Fig. 10 Geological sketch map of the Yuyuanshan ore district in the Fenghuangshan ore field

体分析结果见表 2。

石英-硫化物阶段 3 件样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值变化范围为 $-4.3\text{‰} \sim +0.3\text{‰}$ ； $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值的变化范围为 $+10.3\text{‰} \sim +13.5\text{‰}$ ，平均为 $+12.2\text{‰}$ 。碳酸盐阶段 3 件样品的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值变化范围为 $+0.9\text{‰} \sim +2.9\text{‰}$ ，

平均为 1.9‰ ； $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值变化范围为 $+10.7\text{‰} \sim +13.2\text{‰}$ ，平均为 $+11.8\text{‰}$ （表 2）。

4.3 硫同位素

本文对朱家山铜矿、药园山铜矿、铁山头铜矿等矿床石英-硫化物阶段金属硫化物 8 件样品进行了硫

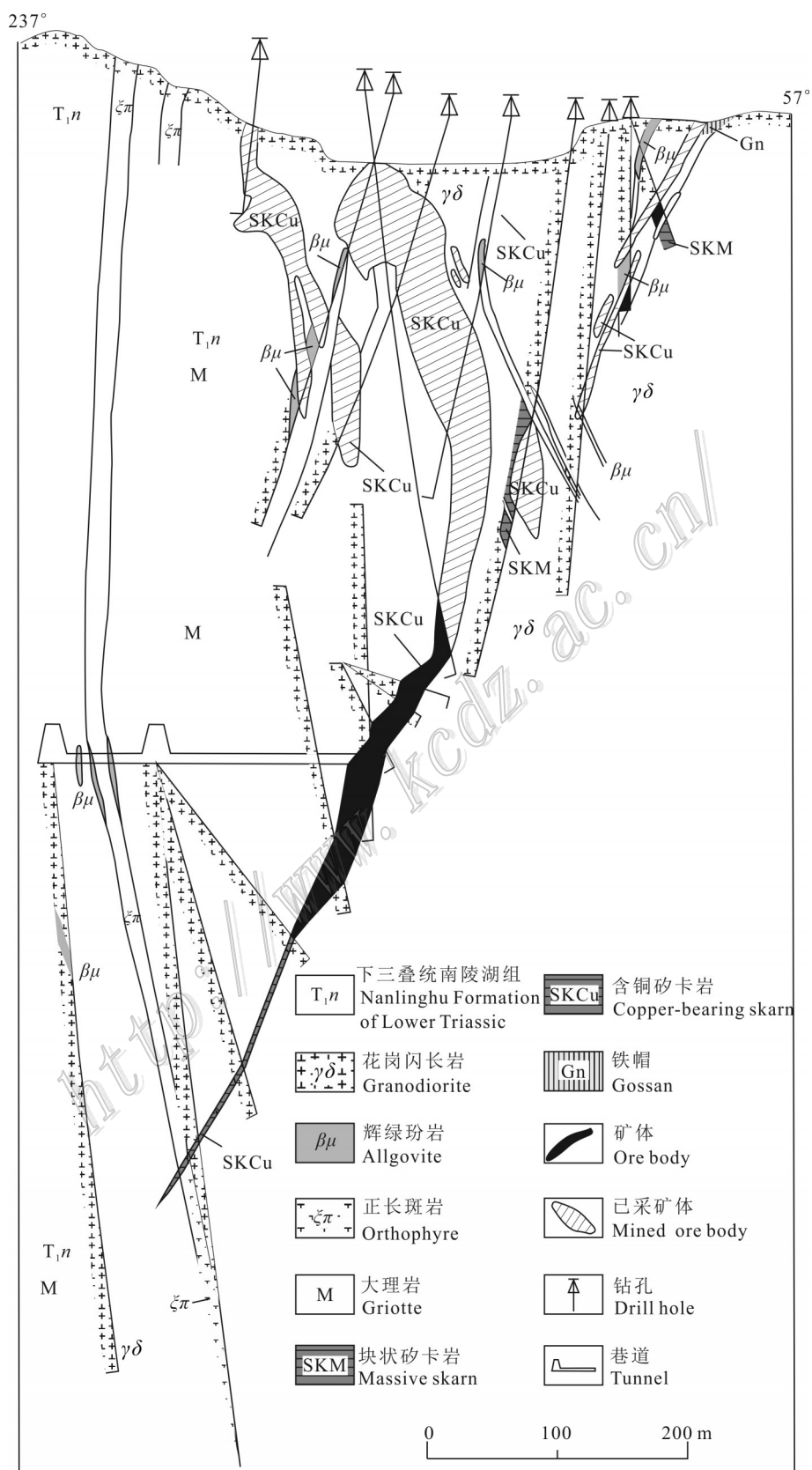


图 11 凤凰山矿田药园山铜矿床剖面图

Fig. 11 Section map of the Yuyuanshan Cu deposit in the Fenghuangshang ore field

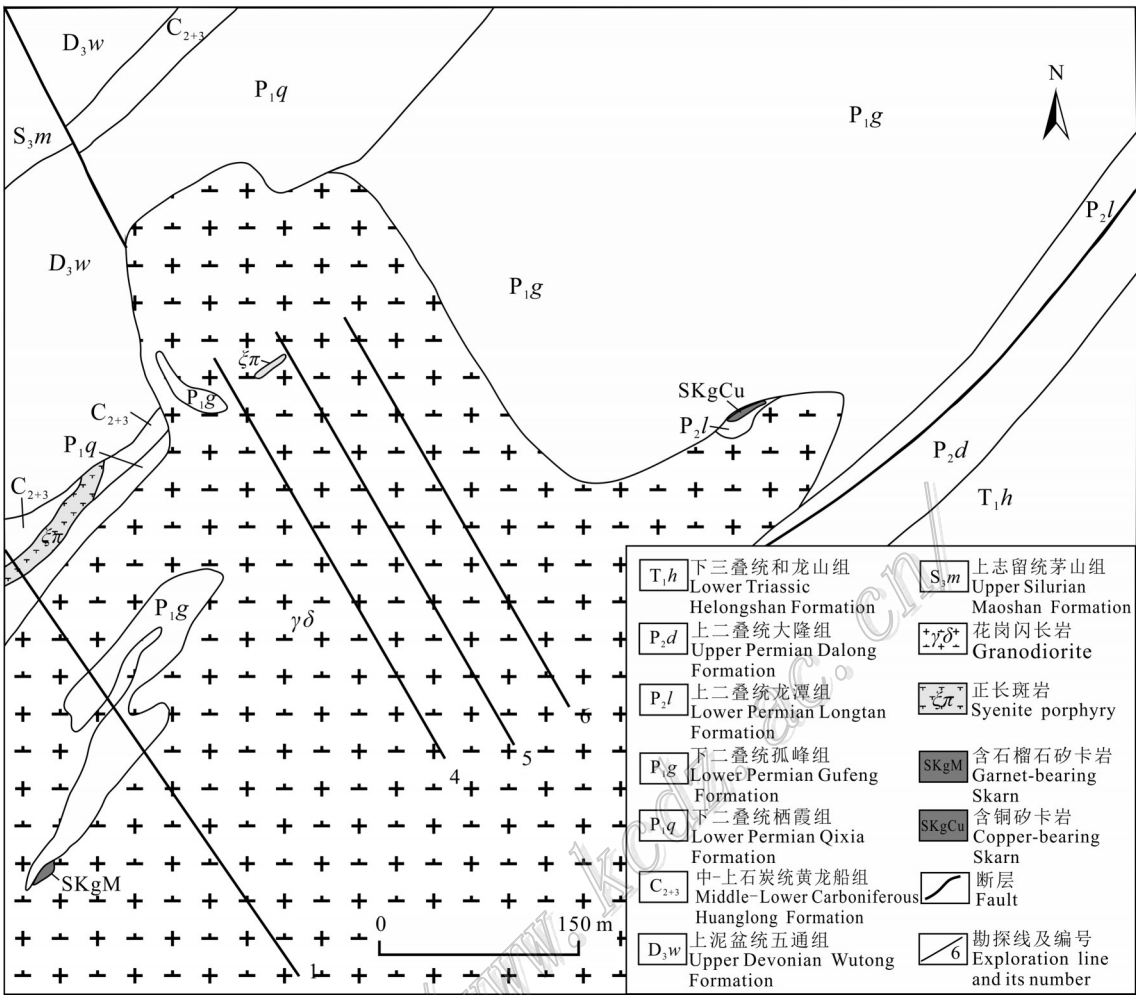


图 12 凤凰山矿田朱家山矿区平面地质图

Fig.12 Geological sketch map of the Zhujiashan ore district in the Fenghuangshan ore field

同位素组成测试,测试结果见表3。

矿田内主要矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为+0.2‰~+6.5‰,除龙潭肖铜矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为+10.5‰,其他矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值均小于+10‰(表3)。总体来看,不同硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值

范围很集中,暗示矿床中硫的来源较单一,本区矿体中 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中于+0.2‰~+3.5‰。

4.4 铅同位素

对药园山、铁山头、龙潭肖等矿床石英-硫化物

表 2 凤凰山矿田主要矿床热液方解石碳、氧同位素组成

Table 2 The C-O isotope compositions of hydrothermal calcites from the main deposits in the Fenghuangshan ore field

矿床	样号	成矿阶段	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	取样位置
铁山头	TST-1	石英-硫化物	-4.3	-19.9	10.3	-58 m中段采场 I 号矿体
金山冲	JSC	石英-硫化物	0.3	-17.6	12.7	-10 m中段采场
龙潭肖	LTX	石英-硫化物	-2.0	-16.9	13.5	+90 m中段 I 号矿体
	FH-12	碳酸盐	0.9	—	10.7	
药园山	FH-91	碳酸盐	1.9	—	11.4	瞿泓滢等,2011
	FH-58	碳酸盐	2.9	—	13.2	

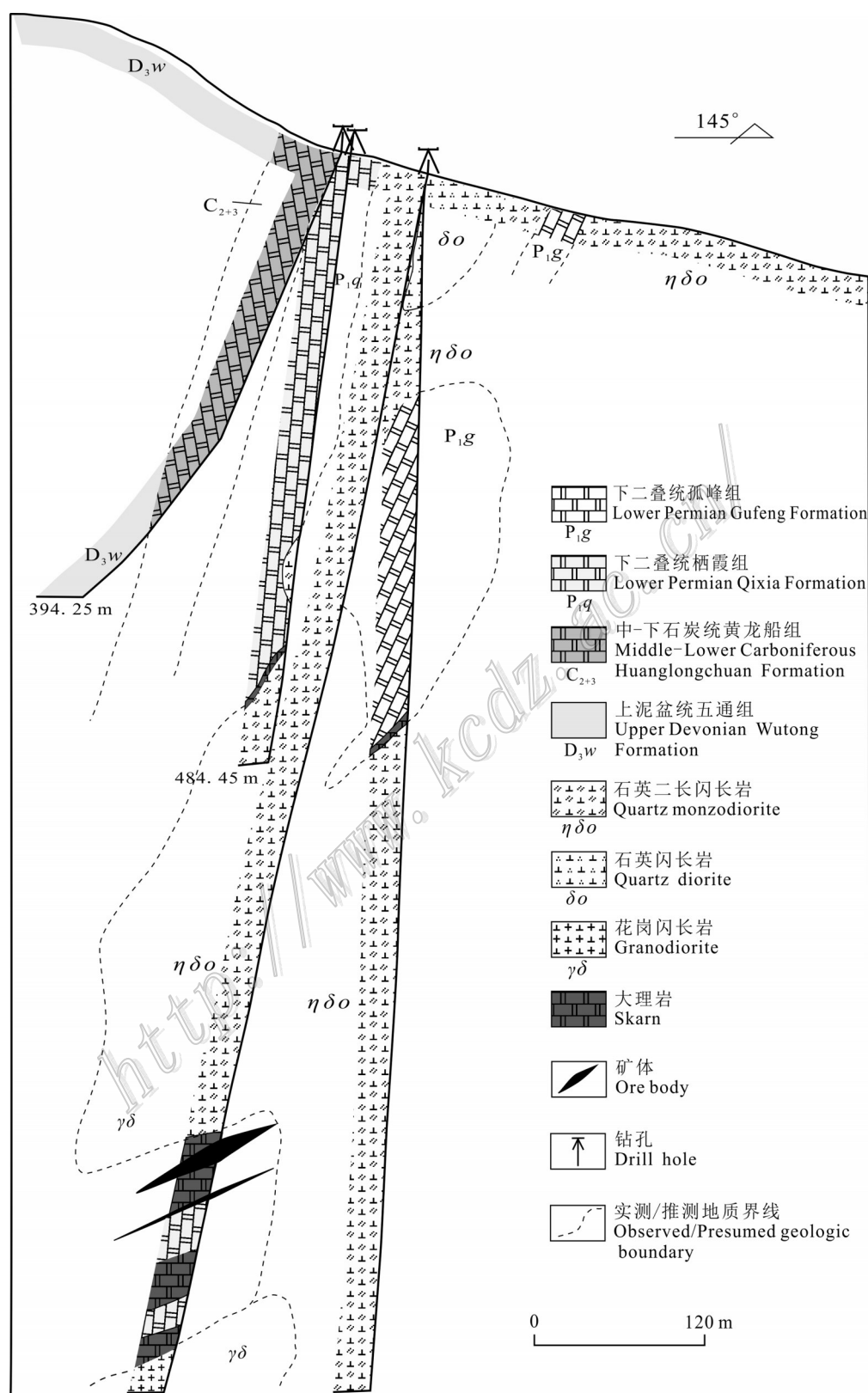


图 13 凤凰山朱家山全国矿床 1 线地质剖面图

Fig. 13 Geological section along No.1 line of the Zhujiashan Cu deposit in the Fenghuangshang ore field

表3 凤凰山矿田主要矿床硫化物硫同位素组成

Table 3 The S isotope compositions of sulfide minerals from the main deposits in the Fenghuangshan ore field

矿床	样号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	取样位置
朱家山	ZJS	闪锌矿	6.5	ZK67孔深992 m
铁山头	TST-1	黄铜矿	2.1	-58 m中段采场I号矿体
	TST-2	黄铜矿	2.3	-100 m355线YMI号矿体
药园山	YYS-1	黄铜矿	0.2	-440 m中段CM37II号矿体
	YYS-2	黄铁矿	4.0	
龙潭肖	LTX	黄铜矿	10.5	+90 m中段I号矿体
金山冲	JSC	黄铁矿	3.5	-10 m中段采场
清水塘	QST	黄铁矿	4.7	+183 m中段采场II号矿体
药园山	FH-119	黄铁矿	2.1	瞿泓滢等, 2011
	FH-121	黄铁矿	2.4	
	FH-122	黄铁矿	2.9	
	FH-126	黄铁矿	0.8	

阶段的金属硫化物7件样品进行了铅同位素组成测试。测试样品的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围在38.118~38.529之间,平均值为38.347; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围在15.524~15.638之间,平均值为15.574; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围在18.250~18.562之间,平均值为18.379(表4)。

5 讨论

5.1 成矿时代

成矿时代的确定,对于分析矿床成因、理解成矿

作用和地球动力学背景有着重要意义。近年来,随着分析测试技术的不断进步,辉钼矿的Re-Os同位素定年成为目前确定成矿时代的最好方法(Selby et al., 2001; Stein et al., 2010)。研究表明,铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩的锆石U-Pb年龄为152~132 Ma(吴才来等, 2003; Wu et al., 2017),凤凰山岩体也属于高钾钙碱性系列,锆石U-Pb年龄为139~144 Ma。瞿泓滢等(2010a)对采自凤凰山铜矿床的7件辉钼矿样品进行了Re-Os同位素定年,其模式年龄为139.1~142.0 Ma。毛景文等(2004)获得南阳山7件辉钼矿样品模式年龄为136.9~141.1 Ma。Liu等(2018)研究了狮子山矿田的侵入岩与矿床之间的成因关系,认为该矿田内青山脚岩体是幔源玄武质岩浆和地壳长英质岩浆混合的产物,侵入岩年龄为137~141 Ma(吴才来等, 2013),与冬瓜山铜金矿床的成矿年龄一致(137 Ma)。然而,谢建成等(2008)对新桥铜金铁硫矿床进行了研究,获得黄铁矿Re-Os年龄为 (126 ± 1.1) Ma,低于区内与中酸性侵入有关的铜金矿床的形成时代。

因此,铜陵地区可能存在2期成矿事件,第一期是年龄为137~141 Ma的铜金矿床成矿事件,第二期是年龄为126 Ma的铁硫矿床成矿事件。本文对凤凰山矿田仙人冲铜矿床、清水塘铜矿床的辉钼矿样品进行了Re-Os同位素年龄测试。结果表明,仙人冲铜矿床辉钼矿模式年龄为 (140.9 ± 2.2) Ma,清水塘铜矿床辉钼矿模式年龄为 (142.2 ± 2.0) Ma,与铜陵地区Cu-Au矿床的成矿时代基本一致,说明这2个矿床与上述各金属矿床属于同一成矿事件,是第一成矿期的产物。由上可见,区内所有的成矿时代均属于岩浆活动期内

表4 凤凰山矿田主要矿床硫化物铅同位素组成数据表

Table 4 The Pb isotope compositions of sulfide minerals from the main deposits in the Fenghuangshan ore field

矿床	样号	矿物	$\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{204}$	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204}$	$\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}$	取样位置
铁山头	TST-1	黄铜矿	38.529	15.594	18.483	-58 m中段采场 I 号矿体
	TST-2	黄铜矿	38.166	15.545	18.279	-100 m355线YMI号矿体
药园山	YYS-1	黄铜矿	38.484	15.586	18.562	-440 m中段CM37 II 号矿体
	YYS-2	黄铁矿	38.118	15.535	18.291	
龙潭肖	LTX	黄铜矿	38.524	15.594	18.506	+90 m中段 I 号矿体
金山冲	JSC	黄铁矿	38.126	15.524	18.280	-10 m中段采场
清水塘	QST	黄铁矿	38.483	15.638	18.250	+183 m中段采场 II 号矿体

的某一时间段,说明成矿作用与岩浆作用具有密切的成因联系(张达等,2006;Wu et al.,2010;瞿泓滢等,2010a)。

5.2 成矿流体来源

热液矿床中,方解石的碳、氧同位素组成是示踪热液矿床成矿流体来源及演化的有效手段,不同地质储库中的碳同位素组成有明显的差别,深部来源的碳一般为岩浆来源或地幔射气来源,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围分别为 $-9\text{‰} \sim -3\text{‰}$ 和 $-5\text{‰} \sim -2\text{‰}$ (Taylor, 1986);沉积岩中碳酸盐岩脱气或含盐卤水与泥岩相互作用来源的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围为 $-2\text{‰} \sim +3\text{‰}$,显示重碳同位素的特征;海相碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 大多稳定在0附近(Veizer et al., 1980)。本文对采自铁山头铜矿床、金山冲铜矿床和龙潭肖铜矿床的3件方解石样品进行了碳、氧同位素测试,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-4.3\text{‰} \sim +0.3\text{‰}$,平均为 $+2.2\text{‰}$ (表2)。瞿泓滢等(2010a)获得凤凰山铜矿床 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $+0.9\text{‰} \sim +2.9\text{‰}$,平均为 $+1.9\text{‰}$ 。上述研究表明,凤凰山矿田成矿流体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 $-4.3\text{‰} \sim +2.9\text{‰}$,样品在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 组成图解中(图14),落入花岗岩区域内及其右侧,反映成矿流体中的碳具有多来源的特征,即一部分来自岩浆,另一部分来自沉积碳酸

盐围岩。

成矿流体可能来自大气降水、海水、初生水、岩浆水、封存水等,氧同位素是区分成矿流体中不同来源水的重要方法。测试样品中的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $+10.7\text{‰} \sim +13.2\text{‰}$,平均为 $+11.8\text{‰}$ (表2),与岩浆热液的 $\delta^{18}\text{O}$ 值($+6\text{‰} \sim +13\text{‰}$; Ohmoto, 1986)相近,在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 图解中(图14),大部分样品位于花岗岩范围内及其附近,表明成矿流体中的水以岩浆热液为主。区内矿床与岩体的时空分布关系也证实了这一点。Liu等(2018)的研究表明,铜陵狮子山矿田青山脚石英二长岩与冬瓜山铜金矿床成矿在时空上具有密切的联系,认为该岩体是地幔和壳源物质部分熔融的产物,说明成矿物质来源与岩体相似,同为壳幔混合来源。石英中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别是 $-71.5\text{‰} \sim -80.4\text{‰}$ 和 $+4.51\text{‰} \sim +8.97\text{‰}$;方解石中的 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别是 $-60.9\text{‰} \sim -70.7\text{‰}$ 和 $+4.41\text{‰} \sim +4.91\text{‰}$,与岩浆水的范围一致,说明成矿流体中的水可能主要来自岩浆水,也指示着成矿与岩浆活动关系密切。

5.3 成矿物质来源

金属硫化物的硫同位素组成被广泛用于示踪矿床中硫的来源,在判断成矿热液物理化学条件和确

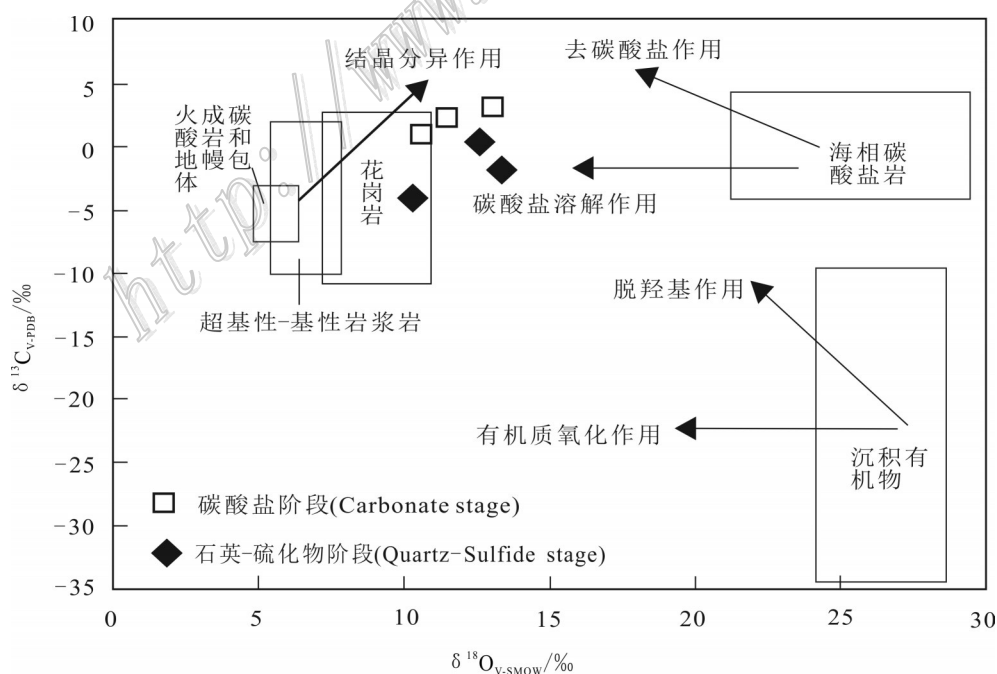


图14 凤凰山矿田主要矿床 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 图解(底图据刘建明等,1997;毛景文等,2002修改)

Fig. 14 The $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ diagram of calcite from the main deposits in the Fenghuangshan ore field (base map after Liu et al., 1997; Mao et al., 2002)

定矿床成因类型中起着重要作用。不同地质储库中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值差别很大,如幔源硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 $0\pm 3\text{‰}$,海水硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+20\text{‰}$,而沉积硫通常具有负的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (Chaussidon et al., 1990; Rollison, 1993)。Ohmoto等(1979)认为,在矿物组合简单的情况下,矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值可以代表热液的总硫值。本文对朱家山铜矿、药园山铜矿、铁山头铜矿等矿床石英-硫化物阶段金属硫化物进行了硫同位素组成测试(表3),结果表明,矿田内主要矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+0.2\text{‰}\sim +6.5\text{‰}$,除龙潭肖铜矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+10.5\text{‰}$,其他矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值均小于 $+10\text{‰}$ (表3)。总体来看,不同硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围很集中,暗示矿床中硫的来源较单一,与大部分火成岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值($0\sim +5\text{‰}$, Ohmoto et al., 1979)相近,反映成矿流体中的硫具有岩浆来源特征,且部分可能为幔源硫。这与铜陵地区马山金硫矿床的硫同位素的研究结果一致。田世洪等(2007)对马山金硫矿床硫同位素研究表明,成矿阶段硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+5.1\text{‰}\sim +8.7\text{‰}$,与岩体相似,说明岩体与矿体具有相同的硫源,同时指示成矿流体硫来源于岩浆,而与地层硫源明显不同;氢-氧同位素显示成矿流体水主要来自岩浆,而与地层水来源于变质水的特征完全不同。因此,他们认为马山矿床成矿作用与区内燕山期岩浆活动密切相关。

铅同位素组成可作为地壳演化信息及古地壳活动的证据,Zartman等(1988)提出“铅构造模式”可以探索壳源和幔源之间铅同位素的关系。药园山、铁山头、龙潭肖等矿床石英硫化物阶段的金属硫化物7件样品的铅同位素组成测试结果表明,这些矿床硫化物的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 $38.118\sim 38.529$ 之间,平均为 38.347 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 $15.524\sim 15.638$ 之间,平均为 15.574 ; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 $18.250\sim 18.562$ 之间,平均为 18.379 (表4)。在Zartman铅同位素构造模式图中(图15),各矿床矿石矿物铅同位素投点位于造山带及其与地幔区之间,说明成矿流体中相当一部分铅可能来自地幔。

此外,Re-Os同位素分析除确定成矿时代外,还可以用来指示成矿物质的来源。研究表明,从幔源—壳幔混合源—壳源,矿床内辉钼矿中 $w(\text{Re})$ 逐渐降低。成矿物质为地幔来源的,辉钼矿 $w(\text{Re})$ 为($n\times 10\sim n\times 10^3$) $\times 10^{-6}$;壳幔混合源的 $w(\text{Re})$ 为($n\times 10$) $\times 10^{-6}$;成矿物质为壳源的 $w(\text{Re})$ 一般为 $n\times 10^{-6}$ (李文昌等, 2012)。本文测试的辉钼矿样品中 $w(\text{Re})$ 为 $(47.1\sim$

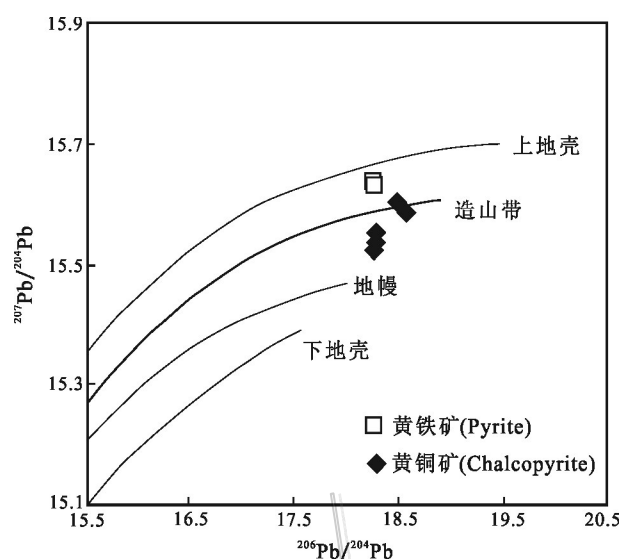


图15 凤凰山矿田主要矿床铅同位素构造模式图(底图据 Zartman et al., 1988)

Fig. 15 Lead isotope diagram of the Fenghuangshan ore field (base map after Zartman et al., 1988)

$103.2\sim 185.5$) $\times 10^{-6}$,与瞿泓滢等(2010a)获得凤凰山铜矿床中辉钼矿的 $w(\text{Re})$ ($54.5\sim 185.5$) $\times 10^{-6}$ 相近,均显示成矿物质具有壳幔混合源的特征。结合以上硫、铅同位素特征,笔者认为凤凰山矿田成矿物质主要来自岩浆,且部分来自地幔,具有典型的壳幔混合源成因。

5.4 成矿机制及动力学背景

研究表明,铜陵地区高钾碱性系列侵入岩是深位岩浆房分异的富碱基性岩浆与地壳易熔体组分部分熔融形成的长英质岩浆混合后形成的(Wu et al., 2014; 2017)。因此,岩浆既有幔源成分,也有壳源成分。岩浆混合作用以及岩体与深部岩浆房的联系为成矿提供了非常有利的条件。Xie等(2012)的研究成果显示,中国东部存在EM1型和EM2型富集地幔,而铜陵地区位于这2种富集地幔的转换地带,起源于该地带的富碱基性岩浆上升至壳幔过渡带形成深位岩浆房,并发生岩浆分异结晶作用,形成堆积岩。深位岩浆房本身的热量和结晶潜热使得上部低熔点组分部分熔融形成多个长英质浅位岩浆房(Wu et al., 2017)。随着区域构造及岩浆的演化,深位岩浆房分异的岩浆上升进入浅位酸性岩浆房,2种岩浆发生混合,形成含有大量暗色微粒闪长质包体的混合岩浆,岩浆侵位到浅部碳酸盐岩地层形成岩体,流

体在岩体接触带活动形成大规模的矽卡岩化带,并在有利部位形成矽卡岩型矿床。由于岩体与深部岩浆房保持着长期的成因联系,深部岩浆房不断地向浅部岩体输送成矿物质,导致成矿作用是一个漫长的地质作用过程,凤凰山岩体周围的矿床就是这样形成的。

结合区域构造特点,笔者认为,中国东部在晚侏罗世至早白垩世正处于由古特提斯构造域向环太平洋构造域的转换时期(吴才来等,2013;Li J W et al., 2009; Li H et al., 2011)。在这一时期,古太平洋板块开始向欧亚板块俯冲,由于受到了华北克拉通的阻挠,形成了一系列NE向褶皱和断裂(Liu et al., 2018),并产生了大规模的岩浆活动(Ames et al., 1996; Mao et al., 2005; Dou et al., 2015)。在这一构造演化过程中,铜陵地区的构造格局由东西向开始向北东-北北东向转换(Zhou et al., 2008; Zhu et al., 2010; Xie et al., 2008),同时激活了地壳和地幔之间的构造活动,引起了大规模壳源和幔源岩浆混合并沿构造裂隙侵位,并在这一过程中形成了大规模的铜金多金属矿床(Liu et al., 2018)。如铜陵狮子山矿田内青山脚岩体成岩环境为后碰撞伸展环境,形成了冬瓜山大型铜金矿床。毛景文等(2003)的研究成果显示,中国东部中生代大规模成岩-成矿作用主要发生在3个时期:200~160 Ma、~140 Ma和130~110 Ma,成矿过程是对大规模岩石圈减薄、拆沉作用的响应。根据本文获得的成矿年龄可知,凤凰山矿田的成矿作用发生在中国东部第二个成矿高峰期,这一时期也正是中国东部构造体制由挤压向伸展的过渡阶段,来源于地壳和地幔的混合源成矿物质是中国东部深部岩石圈拆沉、减薄和地幔物质上涌的结果,大规模壳幔混源岩浆侵位是对深部过程的响应。

6 结 论

(1)凤凰山矿田的Re-Os同位素测年结果显示,仙人冲铜矿床辉钼矿模式年龄为(140.9±2.2)Ma,清水塘铜矿床辉钼矿模式年龄为(142.2±2.0)Ma,结合前人研究成果,凤凰山矿田主要成矿时代介于136.9~142.2 Ma之间,与凤凰山岩体的侵位时代和岩浆期后热液时代基本一致。

(2)方解石的碳、氧同位素分析显示凤凰山矿田成矿流体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 的值为-4.3‰~+2.9‰,暗示

成矿流体中的碳具有多来源的特征,即部分来自岩浆,部分来自沉积碳酸盐围岩;测试样品的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为+10.7‰~+13.2‰,反映成矿流体中的水以岩浆热液为主。

(3)矿田内主要矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为+0.2‰~+6.5‰,成矿流体中的硫主要为岩浆来源,部分可能来自幔源,铅同位素也显示了相似的特征。辉钼矿样品中 $w(\text{Re})$ 为 $(47.1\sim 103.2)\times 10^{-6}$,显示成矿物质具有壳幔混源的特征。

(4)晚侏罗世—早白垩世是中国东部构造体制由挤压向伸展的过渡阶段,140 Ma是中国东部第二成矿高峰期,铜陵凤凰山矿田各矿床正是在这一地质背景下和这一成矿高峰期形成的。

References

- Ames L, Gaozhi Z and Baocheng X. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons, central China[J]. *Tectonics*, 15(2): 472-489.
- Chaussidon M and Lorand J P. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariège (North-Eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(10): 2835-2846.
- Chang Y F and Liu X G. 1983. Stratabound skarn type deposit: A case study of Lower Yangtze depression within Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 2(1):13-22 (in Chinese with English abstract).
- Chang Y F, Liu X P and Wu Y C. 1991. The Iron-copper ore forming belt of Middle-Lower Yangtze River[M]. Beijing, Geological Publishing House. 1-379 (in Chinese).
- Dou Z J, Yang Z L and Chen Z H. 2015. Geochronology and significance of Lishui Basin (SUB) volcanic rocks of the Yangtze River metallogenic belt[J]. *Minerals and Rocks*, 35(2): 25-31.
- Lai J Q, Chi G X, Peng S L, Yang B and Shao Y J. 2006. Fluid characteristics of the Fenghuangshan copper (gold) skarn-porphyry deposit in Tongling, Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, (s1): 171-174 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Li H, Zhang H, Ling M X, Wang F Y, Ding X, Zhou J B, Yang X Y, Tu

- X L and Sun W D. 2011. Geochemical and zircon U-Pb study of the Huangmeijian A-type granite: Implications for geological evolution of the Lower Yangtze River belt[J]. *International Geology Review*, 53(5-6): 499-525.
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, Ma C Q, Sergio Z S D and Vasconcelos P. 2009. Late Mesozoic magmatism from Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157(3): 383-409.
- 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).
- Liu J M and Liu J J 1997. Basin fluid genetic model of sediment-hosted micro-dissminated gold deposits in the gold-triangle area between Guizhou, Guagnxi and Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(4): 448-456(in Chinese with English abstract).
- Liu Z F, Shao Y J, Zhang Y and Wang C. 2018. Geochemistry and geochronology of the Qingshanjiao granites: Implications for the genesis of the Dongguashan copper (gold) ore deposit in the Tongling ore district, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 99: 42-57.
- Mao J W, Hao Y and Ding T P. 2002. Mantle fluids involved in metallogenesis of Jiaodong(East Shandong) gold district: Evidence of C, O and H isotopes[J]. *Mineral Deposits*, 21(2): 121-128(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 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(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Stein H J, Du A D, Zhou T F, Mei Y X, Li Y F, Zang W S and Li J W. 2004. Molybdenite Re-Os precise dating for molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the Middle-Lower Reaches of Yangtze River Belt and its implications for mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1):121-131(in Chinese with English abstract)
- Mao J W, Xie G Q and Zhang Z H. 2005. Mesozoic largescale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Perogica Sinica*. 21(1): 169-188.
- Mao Z L, Lan J Q, Peng S L, Shao Y J and Yang B. 2004. The chemical characteristics and significances of the Fenghuangshan copper deposit in Tongling, Anhui Province[J]. *Geology and Prospecting*, 40(2): 28-31(in Chinese with English abstrac).
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[A]. In Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*[C]. New York: Wiley. 509-567.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Rev. Mineral*, 16(6): 491-559.
- Qu H Y, Pei R F, Wang Y L and Li J W. 2010a. Re-Os dating of molybdenite from the Fenghuangshan skarn Cu deposit in Tongling, Anhui Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 785-796(in Chinese with English abstract).
- Qu H Y, Pei R F, Li J W and Wang Y L. 2010b. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Fenghuangshan quartz monzodiorite and granodiorite in Tongling area, Anhui Province and its geological implication[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 40(3): 581-590 (in Chinese with English abstract).
- Qu H Y, Pei R F, Wang H L, Li J W, Wang Y L and Mei Y X. 2011. Mantle-derived ore-forming fluids of the Fenghuangshan Cu deposit: Evidences form microthermometric and isotopic studies[J]. *Geological Review*, 57(1): 50-62(in Chinese with English abstract).
- Rollison G. 1993. Volumetric closed chemical transfer system[P].
- Selby D and Creaser R A. 2001. Late and Mid-Cretaceous mineralization in the Northern Cordillera: Constraints from Re-Os molybdenite dates[J]. *Econ. Geol.*, 96(6):1461-1467.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group II A, III B, IV A, V B iron meteorites[J]. *Science*, 271: 1099-1102.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L and Scherstén A. 2010. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 13(6): 479-486.
- Taylor B E. 1986. Magmatic volatiles: Isotopic variation of C, H, and S[J]. *Rev. Mineral*, 16(1):185-225.
- Tian S H, Hou Z Q, Yang Z S, Ding T P, Meng Y F, Zeng P S, Wang Y B and Wang X C. 2007. REE and stable isotope geochemical characteristics of the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 929-938(in Chinese with English abstract).
- Veizer J, Holser W T and Wilgus C K. 1980. Correlation of ^{13}C / ^{12}C

- and $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ secular variations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(4): 579-587.
- Wu C L, Chen S Y, Shi R D and Hao M Y. 2003. Origin and features of the Mesozoic intermediate-acid intrusive in Tongling area, Anhui, China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(1): 41-48(in Chinese with English abstract).
- Wu C L, Yao S Z, Gao Q M, Guo X Y, Liu L G, Guo H P, Gao Y H, Lei M, Qing H P and Chen Q L. 2010. Zircon SHRIMP dating of high-K, calc series intrusive rocks from Tongling, Anhui, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1746-1758.
- Wu C L, Dong S W and Guo X Y. 2013. Intermediate-acid intrusive rocks from Tongling, China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Wu C L, Dong S W, Robinson P T, Frost B R, Gao Y H, Lei M, Chen Q L and Qin H P. 2014. Petrogenesis of high-K, calc-alkaline and shoshonitic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province (eastern China), and their tectonic implications[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 126(1-2): 78-102.
- Wu C L, Dong S W, Wu D, Zhang X and Ernst W G. 2017. Late Mesozoic high-K calc-alkaline magmatism in Southeast China: The Tongling example[J]. *International Geology Review*, (1): 1-35.
- Xie G Q, Mao J W, Li R L and Bierlein F P. 2008. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the south-eastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting[J]. *Lithos*, 104: 216-230.
- Xie J C, Yang X Y, Du J G and Sun W D. 2008. Zircon U-Pb geochronology of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling region: Implications for copper-gold mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1782-1800(in Chinese with English abstract).
- Xie J C, Yang X Y, Sun W D and Du J G. 2012. Early Cretaceous dioritic rocks in the Tongling region, eastern China: Implications for the tectonic settings[J]. *Lithos*, 150: 49-61.
- Zartman R E and Haines S M. 1988. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs—A case for bi-directional transport[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(6): 1327-1339.
- Zhang D, Wu G G, Di Y J, Zang W S, Shao Y J, Yu X Q, Zhang X X and Wang Q F. 2006. Emplacement dynamics of Fenghuangshan pluton(Tongling, Anhui Province: Constraints from U-Pb SHRIMP dating of zircons and structural deformation[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 823-829(in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Lu S M, Shang S G, Cooke D, Meffre S and Zhao G. 2008. Geochronology of the volcanic rocks in the Lu-Zong basin and its significance[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(10): 1470-1482.
- Zhu G, Niu M, Xie C and Wan Y. 2010. Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu fault zone: Evidence for geodynamic switching of the East China continental margin[J]. *The Journal of Geology*, 118(3): 277-293.

附中文参考文献

- 常印佛, 刘学圭. 1983. 关于层控式矽卡岩型矿床——以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例[J]. *矿床地质*, 2(1): 11-20.
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带[M]. 北京: 地质出版社.
- 赖健清, Chi Guoxiang, 彭省临, 杨斌, 邵拥军. 2006. 安徽铜陵凤凰山铜(金)矿床矽卡岩型与斑岩型复合成矿作用流体研究[J]. *矿床地质*, (增刊): 171-174.
- 李文昌, 余海军, 尹光侯, 曹晓民, 黄定柱, 董涛. 2012. 滇西北铜厂沟钨多金属矿床辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其成矿环境[J]. *矿床地质*, 31(2): 282-292.
- 刘建明, 刘家军. 1997. 滇黔桂金三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J]. *矿物学报*, (4): 448-456.
- 毛景文, 赫英, 丁悌平. 2002. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据[J]. *矿床地质*, 21(2): 121-128.
- 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*, 33(4): 289-299.
- 毛景文, Stein H, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 臧文栓, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金矿 Re-Os 年龄精测及其对成矿作用的指示[J]. *地质学报*, 78(1): 121-131.
- 毛政利, 赖健清, 彭省临, 邵拥军, 杨斌. 2004. 安徽铜陵凤凰山铜矿床地球化学特征及其意义[J]. *地质与勘探*, 40(2): 28-31.
- 瞿泓滢, 裴荣富, 王永磊, 李进文. 2010a. 安徽铜陵凤凰山夕卡岩型铜矿床中辉钨矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26(3): 785-796.

- 瞿泓滢, 裴荣富, 李进文, 王永磊. 2010b. 安徽铜陵凤凰山石英二长闪长岩和花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(3): 581-590.
- 瞿泓滢, 裴荣富, 王浩琳, 李进文, 王永磊, 梅燕雄. 2011. 安徽铜陵凤凰山铜矿床成矿流体特征研究[J]. 地质论评, 57(1): 50-62.
- 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 丁悌平, 蒙义峰, 曾普胜, 王彦斌, 王训诚. 2007. 安徽铜陵马山金硫矿床稀土元素和稳定同位素地球化学研究[J]. 地质学报, 81(7): 929-938.
- 吴才来, 陈松永, 史仁灯, 郝美英. 2003. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因[J]. 地球学报, 24(1): 41-48.
- 吴才来, 董树文, 郭祥焱. 2013. 中国铜陵中酸性侵入岩[M]. 北京: 地质出版社.
- 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 孙卫东. 2008. 铜陵地区中生代侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及 Cu-Au 成矿指示意义[J]. 岩石学报, 24(8): 1782-1800.
- 张达, 吴淦国, 狄永军, 臧文栓, 邵拥军, 余心起, 张祥信, 汪群峰. 2006. 铜陵凤凰山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约[J]. 地球科学, 31(6): 823-829.

<http://www.kcdz.ac.cn/>