

# 安徽铜陵凤凰山燕山期中酸性侵入岩 地球化学特征及其与金属成矿关系

瞿泓滢<sup>1,2,4</sup> 裴荣富<sup>1</sup> 李进文<sup>1</sup> 王永磊<sup>1</sup> 邓月金<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院研究生院, 北京 100037; 3. 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 4. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

**摘要:**安徽铜陵凤凰山铜矿是铜陵矿集区内最典型的矽卡岩型铜矿床之一,也是凤凰山矿田内规模最大的铜矿床。矿区内新屋里岩体属于高钾钙碱性系列,主要岩性为石英二长闪长岩和花岗闪长岩。岩石地球化学特征表明凤凰山中酸性侵入岩岩浆属于壳幔混合型,原始岩浆来源于上地幔碱性玄武岩区并有地壳物质混染,在岩浆不断演化过程中有外来物质的加入,成岩过程以混合作用为主。凤凰山铜矿体分布于岩体与大理岩的内矽卡岩带上,岩体中铜含量较高。铜矿体是岩浆期后热液交代碳酸盐地层形成的。矿体的空间分布受构造变形-岩浆侵入高温高压作用的双重控制。矿化经历了从高温矽卡岩阶段到中低温热液阶段的多期次复合成矿作用。

**关键词:**高钾钙碱性岩;新屋里岩体;岩石地球化学;凤凰山铜矿;铜陵

**中图分类号:**P611.1<sup>+1</sup>      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-3657(2010)02-0311-13

铜陵位于长江中下游中部,是中国最重要的有色金属基地之一,该地区矿床多与燕山期中酸性侵入岩有关。凤凰山铜矿是铜陵矿集区内最典型的矽卡岩型铜矿床之一。前人在矿床地质特征、成矿作用、成矿预测<sup>[1-9]</sup>和岩石地球化学特征、岩体演化、成岩时代、成岩机制<sup>[6,7,10-18]</sup>以及矿田构造、变形特征<sup>[19-23]</sup>等方面做了大量而深入的研究工作。凤凰山铜矿的成矿作用与新屋里岩体(石英二长闪长岩、花岗闪长岩)有着成因关系。新屋里岩体是铜陵矿集区内出露面积最大的岩体,石英二长闪长岩和花岗闪长岩岩体是控制区内铜矿的最主要因素,岩体中铜含量较高,成矿物质主要来自中深部岩体<sup>①</sup>。因此,对凤凰山矿区内侵入岩的研究显得尤其重要。本文研究新屋里岩体的岩石学和地球化学特征以及岩体与金属成矿的关系,以丰富长江中下游成矿带区域成矿规律的研究,并为凤凰山深部找矿提供新的线索和依据。

## 1 矿区地质背景

安徽铜陵地区是长江中下游成矿带重要的铜、金、铁、硫矿床富集区。矿集区位于贵池—马鞍山(印支期)隆起带中部,是一个相对独立的菱形地块。空间上受近东西向铜陵—沙滩角和南北向新桥—木镇隐伏基底断裂控制。其南北两侧分别被两条东西向的隐伏基底断裂围限,与贵池、繁昌两个北东向的S状隆褶带相隔,东西两侧则以北东向大断裂带为界,与宣城—南陵拗陷及长江拗陷两个中新生代的断陷带为邻。

该区出露最老地层为志留系,下、中泥盆统和下石炭统,上三叠统缺失,其他各时代地层发育基本齐全。志留系—中三叠统下部东马鞍山组以海相沉积为主,中三叠统上部月山组—新近系以陆相碎屑岩夹火山岩为主。区内燕山期岩浆活动强烈,侵入岩多

收稿日期:2009-08-24;改回日期:2009-11-20

基金项目:中国地质调查局危机矿山项目“铜陵市凤凰山铜矿深部岩石地球化学找矿预测”(200799093)和南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室基金项目“长江中下游酸性侵入岩体的冷速率、热效应与其成矿强度的示范研究”(15-09-01)资助。

作者简介:瞿泓滢,女,1978年生,博士生,研究方向为大比例尺成矿预测;E-mail:hongyingqu@126.com。

①安徽省地质矿产局 321 地质队。凤凰山设计正文,2006。

为岩株、岩墙状浅成侵入体,呈串状沿铜陵—沙滩角东西向断裂岩浆岩带分布,并形成凤凰山、铜官山、狮子山、新桥和沙滩角五大矿田。侵入岩包括以石英二长闪长岩、花岗闪长岩为主的高钾钙碱性系列岩石和以辉石二长闪长岩为主的橄榄玄粗质系列岩石(图1)。

## 2 矿床地质特征

凤凰山矿田位于下扬子台凹贵池—繁昌褶皱断束的中段,铜陵市东南约35 km的新屋里岩体西侧,东西向沙溪—铜陵基底隐伏断裂与凤凰山复式向斜的交汇部位。凤凰山、铁山头、宝山陶、仙人冲、清水塘、江家冲铜矿床沿岩体接触带产出(图2)。其中,凤凰山铜矿是矿田内规模最大的铜矿床,已探明铜储量

44万t<sup>[2]</sup>。

### 2.1 地层

凤凰山铜矿赋存于新屋里岩体与三叠系南陵湖组和龙山组灰岩之间的接触带上。矿区内出露地层为志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系以及第四系(图2)。

志留系分布在矿区的西北部和东北部,自下而上为高边组、坟头组和茅山组。高边组以页岩夹粉砂质页岩、细砂岩和粉砂岩为主,坟头组和茅山组由细砂岩、粉砂岩及石英砂岩组成。上泥盆统五通组出露于矿区的西北部和东南部,上部以石英砂岩、粉砂岩和粘土质页岩为主,下部以石英砂岩、粉砂质页岩和含砾石英砂岩为主。石炭系为滨海台地相碳酸盐岩沉积,与下伏地层呈假整合接触,出露于凤凰山复式

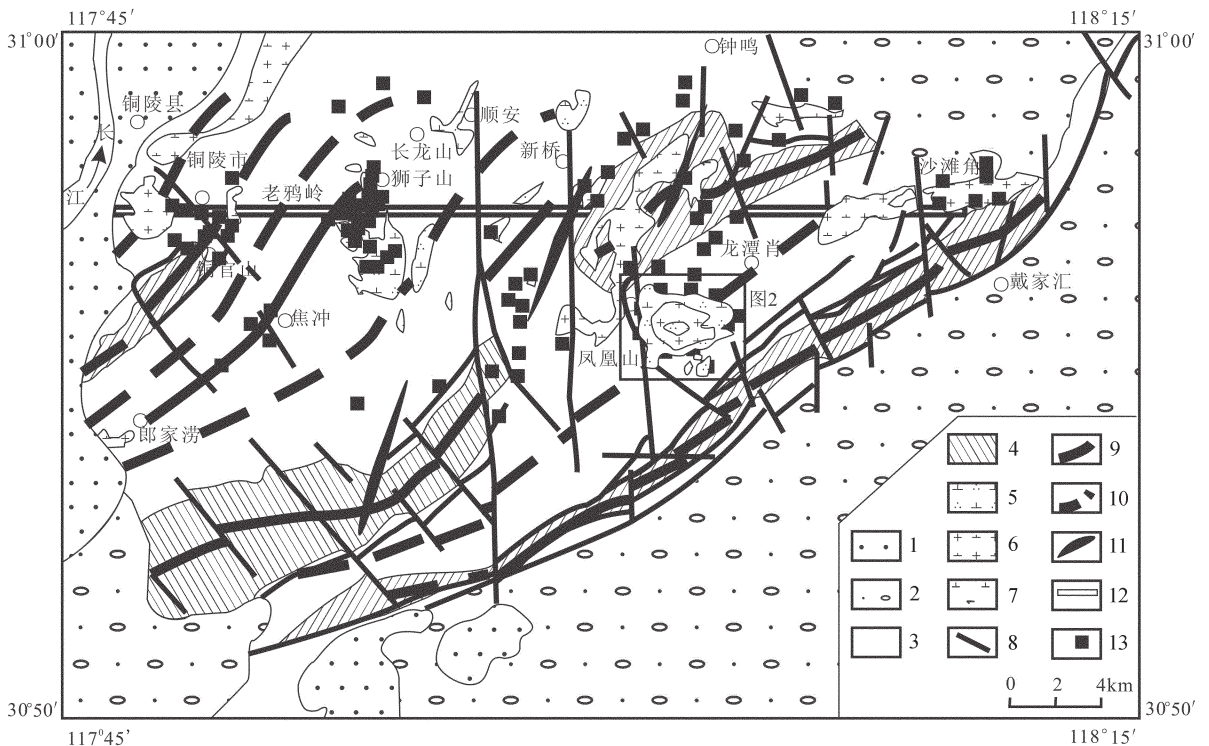


图1 铜陵矿集区地质构造及矿产分布图(据吴淦国等<sup>[2]</sup>)

- 1—古近—新近系泥岩、砾岩夹玄武岩;2—侏罗—白垩系凝灰质砂砾岩、英安质火山岩;3—泥盆—三叠系碳酸盐岩岩、硅质岩、陆源碎屑岩;4—志留系砂岩、粉砂岩、页岩;5—石英二长闪长岩;6—花岗闪长岩;7—辉石二长闪长岩;8—盖层断裂;9—印支期复式背斜;10—印支期复式向斜;11—燕山晚期复式褶皱;12—基底断裂;13—铜、金、硫、铁、铅锌及多金属矿床

Fig.1 Geological-structural map of the Tongling ore cluster area, showing the distribution of mineral resources (modified after Wu Ganguo et al.<sup>[2]</sup>)

- 1-Trassic mudstone, conglomerate intercalated with basalt; 2-Jurassic-Cretaceous tuffaceous sandstone, dacite volcanic rock; 3-Devonian-Triassic carbonatite, silicalite, terrigenous clastic rock; 4- Silurian sandstone, siltstone, shale; 5-Quartz monzodiorite; 6-Granodiorite; 7-Pyroxene monzodiorite; 8-Overburden fault; 9-Indo-Sinian compound anticline; 10-Indo-Sinian compound syncline; 11-Late Yanshanian compound fold; 12-Basement fault; 13-Cu, Au, S, Fe, Pb-Zn and polymetallic deposits

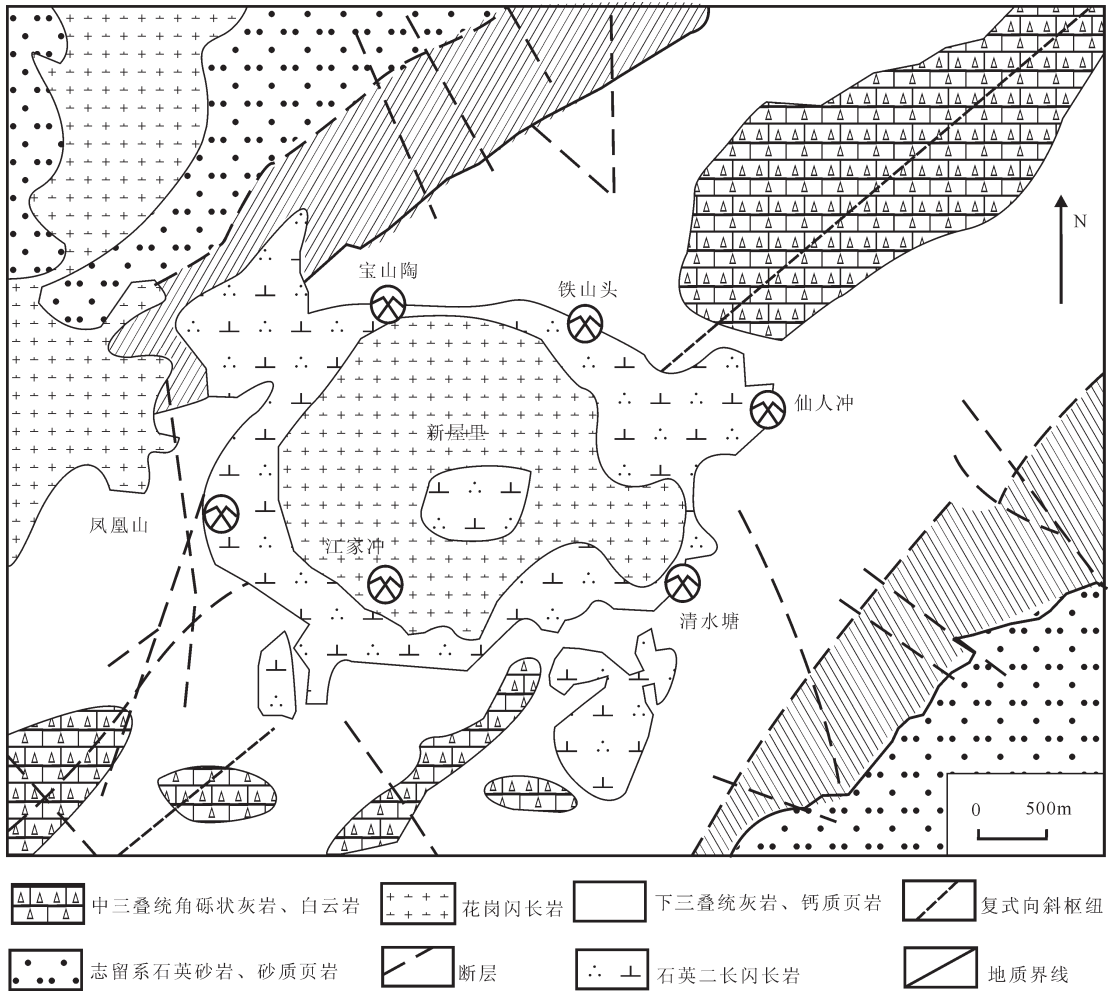


图 2 凤凰山铜矿床地质略图

Fig.2 Geological map of the Fenghuangshan Cu deposit

向斜两翼,由黄龙组生物碎屑灰岩、白云岩、石英砾岩和船山组球状灰岩、生物碎屑灰岩组成。二叠系自下而上由栖霞组生物碎屑灰岩、粉砂质泥质页岩,孤峰组生物碎屑灰岩、白云质灰岩,龙潭组炭质页岩,大隆组泥质页岩、泥质灰岩组成。三叠系出露于矿区中心部位,由下三叠统殷坑组、和龙山组、南陵湖组以及中三叠统东马鞍山组、月山组组成。其中和龙山组和南陵湖组是主要的含矿层位,和龙山组以灰岩、泥质岩和钙质页岩为主,南陵湖组由灰岩、角砾状灰岩、生物碎屑灰岩夹白云质灰岩和钙质页岩组成。殷坑组以钙质页岩夹灰岩透镜体和泥质灰岩为主,东马鞍山组以白云岩和白云质灰岩为主,月山组以角砾状灰岩、角砾状白云岩为主。

### 2.2 构造

新屋里复式向斜与近东西向基底断裂的交汇部

位控制着新屋里岩体的侵位和矿田的形成。矿区构造复杂,印支—燕山期经历多期次构造变形,由北东向、北西向、北北东向 3 组主要断裂组成,其中北西向断裂构造对矿床的局部富集起重要的控制作用。邵拥军<sup>[2]</sup>将矿田构造划分为成矿前、成矿期和成矿后 3 个阶段,并认为北北东向成矿期构造受到燕山期岩浆活动的影响,呈现褶皱、断裂构造纵横交错的复杂特征。翟裕生等<sup>[2]</sup>认为凤凰山铜矿主要褶皱变动发生于印支旋回,燕山旋回则以岩浆活动和断裂变动为主,形成矿区构造的基本形态。

### 2.3 岩浆岩

新屋里岩体是花岗质岩浆多次涌动侵入形成的复式岩体,受北东向褶皱构造及其相伴的北东向、北北东向、北西向、北北西向断裂构造控制,出露面积近 10 km<sup>2</sup>,是铜陵矿集区出露面积最大的岩体。其



主要岩性为石英二长闪长岩(岩体边部)和花岗闪长岩(岩体中部)。岩体的岩性变化不大,细粒结构,近岩体边部与二叠至三叠系碳酸盐地层接触带部位具斑状结构,并伴随较强的钾化和黄铁矿化。石英二长闪长岩呈浅灰色,不等粒结构,粒径 0.5~1.5 mm,主要矿物有斜长石、石英、钾长石、角闪石、黑云母,副矿物有磷灰石、榍石、锆石、磁铁矿等。花岗闪长岩呈灰色,略带肉红色,块状构造,半自形粒状结构,主要由斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母组成,含榍石、磷灰石、锆石、磁铁矿等副矿物。岩体角砾岩化,还可见围岩捕虏体。岩浆侵入活动发生在燕山晚期,石英闪长岩和花岗闪长岩侵入的绝对年龄为 133 Ma,相当于早白垩世<sup>[2]</sup>。张达等<sup>[17]</sup>用锆石 U-Pb 法测得凤凰山花岗闪长岩年龄为(144.2±2.3)Ma,认为新屋里岩体是晚侏罗世形成的一个典型岩体,和铜陵矿集区主要成矿岩体的形成时代一致。

#### 2.4 矽卡岩

凤凰山铜矿是以接触交代为主的矽卡岩型矿床,矿石类型复杂,矽卡岩化发育,以含铜矽卡岩广泛发育为特征,在岩体与大理岩和白云质大理岩(白云岩)的接触带上,形成不同类型的矽卡岩。就其空间分布和原岩岩性可分为内矽卡岩带与外矽卡岩带两类。内矽卡岩带是由石英二长闪长岩经矽卡岩化作用形成,岩性为矽卡岩化石英二长闪长岩。外矽卡岩带主要发育于岩体与围岩接触带的碳酸盐地层内,视围岩岩性及交代程度,可划分为块状细—中粒石榴子石矽卡岩、块状致密—细粒石榴子石矽卡岩、条带状细—中粒石榴子石矽卡岩、条带状致密—细粒石榴子石矽卡岩。根据岩相学特征,凤凰山铜矿床演化过程可划分为 4 个阶段:矽卡岩阶段、退化矽卡岩阶段、石英硫化物阶段、碳酸盐阶段。矽卡岩阶段主要形成由石榴石和辉石组成的矽卡岩。退化矽卡岩阶段主要矿物为绿帘石、绿泥石和角闪石。矿石矿物(黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、斑铜矿、辉钼矿)多集中在退化矽卡岩阶段和石英硫化物阶段形成。赤铁矿、方铅矿和闪锌矿主要集中在石英硫化物阶段和碳酸盐阶段。方解石和石英主要集中在石英硫化物阶段和碳酸盐阶段。矿石矿物成分复杂,主要类型有含铜黄铁矿(磁黄铁矿)型、含铜磁铁矿型、含铜大理岩型、含铜角岩型。

#### 2.5 矿体及矿石特征

凤凰山铜矿的 4 个主要矿体,均赋存于侵入岩与围岩接触带及其附近,其中 I、II、III 号矿体赋存于新屋里岩体与南陵湖组灰岩接触带上,IV 号矿体赋存于岩体与和龙山组灰岩接触带上并受接触带控制。II 号矿体规模最大,呈不规则透镜状或薄板状。矿体与矽卡岩关系密切,并受断裂和接触带的复合控制。近南北向的扩容性构造具有多期次活动特征,形成角砾状矿石。I、III、IV 号矿体断续相连,其延伸方向自南而北由北西转向北东,略呈向西突出的弧形。矿区内主矿体长 321~986 m,控制平均延深 233~350 m,II 号矿体最大延深 700 m,矿体厚度 8.9~35.2 m,矿体倾角陡至直立,总体向南东侧伏。次要矿体和小矿体多分布于主矿体近旁的大理岩、矽卡岩及侵入岩中,矿体长 50~220 m,平均延深 50~156 m,厚 6.0~12.0 m,矿体倾角 65~85°<sup>①</sup>。

毛政利<sup>[20]</sup>按工业类型将凤凰山铜矿床矿石划分为 7 种类型:块状含铜磁铁矿、赤铁矿型,块状含铜菱铁矿型,角砾状矿石型,浸染状含铜石榴石矽卡岩型,块状含铜黄铁矿型,浸染状含铜花岗闪长岩型,浸染状含铜大理岩型。前 3 种是该铜矿主要的矿石类型。不同矿化类型在空间上分界明显,并且与矿体展布方向一致,呈扁平透镜状和狭长带状。含铜磁铁矿、赤铁矿型矿石主要分布在矿体核部,在 II 号矿体中出现分枝复合现象。含铜菱铁矿型矿石围绕含铜磁铁矿、赤铁矿型矿石分布。黄铁矿型矿石在 I 号矿体中分布于矿体边缘,在 II 号矿体中出现在核部。其他类型矿石多产于矿体两侧。主要矿石矿物有黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿、斑铜矿、辉钼矿、菱铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉铜矿、赤铜矿、白铁矿,脉石矿物有方解石、石榴石、斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母、白云石、铁白云石、透辉石、绿泥石、绿帘石、透闪石、阳起石,副矿物为榍石、磷灰石、锆石。主要蚀变有绿泥石化、碳酸盐化、钾长石化。围岩具矽卡岩化、大理岩化、碳酸盐化、钾长石化、黄铁矿化等蚀变。

### 3 样品采集和分析结果

本次研究测试样品均采自岩心,包括 4 件石英二长闪长岩样品、3 件矽卡岩样品和 2 件大理岩样品。岩石化学分析在国家地质实验测试中心完成。主

①安徽省地质矿产局 321 地质队. 凤凰山设计正文, 2006.

量元素用 X-荧光光谱仪(XRF)测定,微量元素用 ICP-MS 测定,稀土元素样品预处理采用 HF+HNO<sub>3</sub> 酸溶法,分析仪器为 ICP-MNS,以 In 作内标,分析精度可达 10<sup>-9</sup>,样品分析时外加国际标准样 AMH-1 和 OU-3 作质量监控,并以标准样品和重复测试的样品数据控制分析质量。

新屋里岩体石英二长闪长岩岩石化学分析结果见表 1,为对比方便,表中还列举了邵拥军<sup>[6,7,25]</sup>测定的花岗闪长岩岩石化学数据。石英二长闪长岩 SiO<sub>2</sub> 含量为 55.90%~64.5%,平均 61.1%,CaO 为 3.30%~8.10%,平均 5.52%。花岗闪长岩 SiO<sub>2</sub> 含量 56.0%~66.0%,平均 64.5%,CaO 3.80%~4.10%,平均 3.95%。除 Y27 受钾长石化影响碱含量偏高外(K<sub>2</sub>O 为 8.60%),两类岩石 K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 平均含量接近,分别为 2.92%和 3.75%,碱总量(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)为 5.84%~7.40%,平均 6.56%,K<sub>2</sub>O/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)平均 0.45。石英二长闪长岩里特曼指数( $\delta$ )平均 3.01 略高于花岗闪长岩岗闪长岩( $\delta$ =2.06)。

Ba 和 Sr 大离子亲石元素(LILE)的质量分数偏高,而 Eu、Sc、Lu、U、Hf、Ta 高场强元素(HFSE)的质量分数偏低(表 2)。V(Sc/V:0.39~0.42)和 Yb(Er/Yb:0.09~0.1) 显示出很强的正异常,Ta(Nb/Ta:0.58~0.62)、Sr(Sr/Nd:1.37~10.7)、Zr(Nd/Zr:0.17~0.93)和 Hf(Hf/Sm:1.78~9.82)呈现正异常,Nb(Nb/Ta:0.58~0.62)、Nd(Sr/Nd:1.37~10.7)、Sc(Sc/V:0.39~0.42)和 Ni(Co/Ni:8.88~21.66)呈现负异常,Sc、Co 和 Ni 亏损(图 3)。

新屋里岩体石英二长闪长岩和花岗闪长岩稀土元素总量偏低(表 1),稀土元素配分曲线(图 4)右

倾,石英二长闪长岩和花岗闪长岩的配分曲线几乎重合在一起,二者具有同源性。 $\sum$ REE 为 97.6 $\times$ 10<sup>-6</sup>~236.0 $\times$ 10<sup>-6</sup>,平均 173.6 $\times$ 10<sup>-6</sup>,低于世界花岗闪长岩稀土元素平均含量 292.0 $\times$ 10<sup>-6</sup>[25]。 $\sum$ LREE 为 76.6 $\times$ 10<sup>-6</sup>~188.2 $\times$ 10<sup>-6</sup>,平均 139.68 $\times$ 10<sup>-6</sup>;  $\sum$ HREE 为 21.0 $\times$ 10<sup>-6</sup>~47.7 $\times$ 10<sup>-6</sup>,平均 33.92 $\times$ 10<sup>-6</sup>;LREE/HREE 值为 3.08~5.45,平均 4.10。(Ce/Yb)<sub>N</sub> 为 5.32~10.52,平均 8.04,属于轻稀土富集型。(La/Sm)<sub>N</sub> 为 3.25~4.95,平均 3.92;(Gd/Yb)<sub>N</sub> 为 1.69~2.31,平均 1.83,轻、重稀土分馏程度均不高,但轻稀土分馏程度略高于重稀土。 $\delta$ Eu 为 0.79~0.96,呈现弱的负 Eu 异常, $\delta$ Ce 为 0.82~1.20,异常不明显。

## 4 讨论

### 4.1 成岩机制探讨

新屋里岩体是一个由花岗质岩浆多次涌动侵入形成的复式岩体,形成于燕山晚期。处于边缘相的石英二长闪长岩和中间相的花岗闪长岩呈渐变接触关系,岩体自边缘向中心分异演化,形成典型的复式岩体。TAS 图解(SiO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)(图 5)显示样品投影点均落在闪长岩类岩石范围内,主要岩性为石英二长闪长岩和花岗闪长岩。石英二长闪长岩和花岗闪长岩稀土元素配分曲线(图 4)均为轻稀土富集型,具有很高的一致性,说明两类岩石来源于统一的岩基,是深部岩浆房经多期次侵入作用形成的同源岩浆岩。侵入岩均以富碱((Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)>7%)、高钾(K<sub>2</sub>O>2.5%)、贫镁为特征,Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 比值普遍大于 1(表 1),按 Le Maitre 等<sup>[27]</sup>的分类方法,为高钾钙碱性系列(图 6-a)。新屋里岩体主量元素里特曼指数为 1.62~3.4,基本上处于 1.99~3.19 范围,进一步证明本区侵入岩属于典型的高钾钙碱性岩石。新屋里岩体石英二长闪长岩 SiO<sub>2</sub> 平均含量(61.1%)略高于中国石英闪长岩 SiO<sub>2</sub> 平均含量(60.5%),花岗闪长岩 SiO<sub>2</sub> 平均含量(64.5%)接近中国花岗闪长岩 SiO<sub>2</sub> 平均含量(65.0%),石英二长闪长岩 K<sub>2</sub>O 含量和 K<sub>2</sub>O/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)值相对花岗闪长岩略高,但均接近中国石英二长闪长岩和花岗闪长岩平均值,属于硅酸弱过饱和岩石(图 6)。

在  $\delta$ Eu-(La/Yb)<sub>N</sub> 图解(图 7)中,样品投影点全部落在壳幔型范围内。Brown 等<sup>[28]</sup>在研究岛弧花岗岩类岩石地球化学特征与岩浆来源时指出,来自幔源的火成岩选择性的富集 Th,而且一般贫 Rb 和

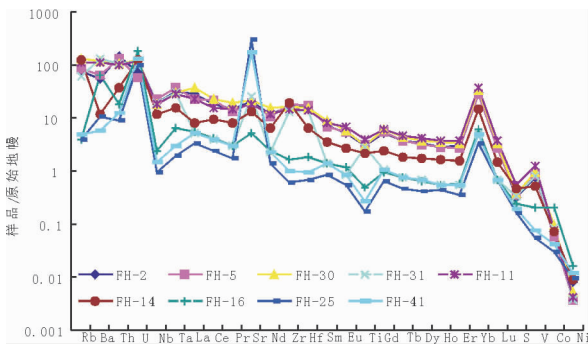


图 3 新屋里岩体原始地幔标准化微量元素蛛网图  
Fig.3 Primitive mantle-normalized trace element spidergram of Xinwuli pluton

表 1 新屋里岩体主量元素和稀土元素分析结果

Table 1 Major and rare earth element compositions of Xinwuli pluton

样品	FH-2	FH-5	FH-30	FH-31	Y3	Y27	Y32	BAN1	76/116	142/106	1	2
SiO <sub>2</sub> /%	64.5	64.0	63.9	63.1	55.9	58.2	60.5	59.4	66.0	63.0	60.5	65.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.1	15.8	15.3	15.4	18.7	19.1	17.5	18.6	16.3	18.6	16.7	16.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.31	2.62	2.47	1.54	2.41	1.40	2.25	3.89	3.18	3.30	2.84	1.89
FeO	2.34	1.85	2.05	2.37	2.99	0.70	0.85	1.61	1.22	1.80	3.49	2.49
CaO	3.38	3.30	3.75	5.51	8.10	7.00	7.51	5.60	3.80	4.10	4.68	3.70
MgO	1.29	1.22	1.44	1.12	1.20	1.50	0.50	2.20	1.20	1.30	2.54	1.94
K <sub>2</sub> O	2.80	3.22	4.18	2.96	2.84	8.60	2.67	2.86	2.67	2.45	2.65	2.95
Na <sub>2</sub> O	3.18	2.62	3.22	3.71	3.79	1.66	4.16	4.11	4.11	4.05	3.68	3.67
TiO <sub>2</sub>	0.51	0.54	0.55	0.52	0.77	1.05	0.82	0.77	0.57	0.72	0.73	0.52
MnO	0.09	0.07	0.11	0.12	0.10	0.07	0.09	0.07	0.09	0.11	0.14	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.22	0.22	0.22	0.22	0.31	0.23	0.33	0.22	0.17	0.23	0.46	0.32
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	5.98	5.84	7.40	6.67	6.63	10.26	6.83	6.97	6.78	6.50		
K <sub>2</sub> O/(K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O)	0.47	0.55	0.56	0.44	0.43	0.84	0.39	0.41	0.39	0.38		
δ	1.67	1.62	2.62	2.21	3.40	6.93	2.66	2.96	2.00	2.11		
La/10 <sup>-6</sup>	20.1	15.9	25.8	25.3	40.1	44.4	48.2	39.6	37.4	43.8		
Ce	34.1	38.8	42.7	42.1	79.6	86.5	87.5	81.3	74.5	75.1		
Pr	4.18	3.58	5.43	5.67	8.69	9.57	9.18	9.12	7.85	8.00		
Nd	16.1	14.3	20.9	21.8	33.9	37.4	34.7	35.3	30.3	30.0		
Sm	3.11	3.08	3.89	4.21	6.93	7.57	6.95	7.29	5.81	5.53		
Eu	0.85	0.90	0.97	1.14	1.82	1.69	1.81	1.90	1.51	1.44		
Gd	3.03	3.17	3.63	4.44	5.36	6.07	5.83	5.69	4.26	4.53		
Tb	0.41	0.40	0.47	0.59	0.81	0.89	0.91	0.81	0.55	0.65		
Dy	2.43	2.35	2.75	3.60	4.44	4.68	4.97	4.48	3.32	3.70		
Y	12.2	11.6	14.2	18.5	25.3	25.1	28.5	24.5	15.9	18.9		
Ho	0.47	0.47	0.56	0.70	0.88	0.87	0.99	0.90	0.62	0.71		
Er	1.44	1.29	1.61	2.09	2.79	2.65	3.00	2.92	1.77	2.14		
Tm	0.20	0.18	0.24	0.30	0.38	0.36	0.42	0.40	0.28	0.35		
Yb	1.40	1.34	1.60	2.05	2.57	2.13	2.74	2.64	1.89	2.08		
Lu	0.22	0.20	0.24	0.30	0.34	0.33	0.38	0.36	0.23	0.29		
ΣREE	100.2	97.6	125.0	132.8	213.9	230.1	236.0	217.1	186.1	197.3		
δ (Eu)	0.85	0.88	0.79	0.81	0.96	0.81	0.92	0.95	0.96	0.93		
δ (Ce)	0.87	1.20	0.85	0.82	1.00	0.98	0.97	1.00	1.02	0.94		
LREE	78.4	76.6	99.7	100.2	171.0	187.1	188.2	174.5	157.3	163.9		
HREE	21.8	21.0	25.3	32.6	42.9	43.1	47.7	42.7	28.9	33.4		
LREE/HREE	3.60	3.65	3.94	3.08	3.99	4.34	3.94	4.09	5.45	4.91		
(La/Yb) <sub>N</sub>	9.70	8.02	10.9	8.34	9.26	12.4	10.4	8.9	11.8	12.5		
(La/Sm) <sub>N</sub>	4.07	3.25	4.17	3.78	3.62	3.66	4.33	3.39	4.02	4.95		
(Ce/Yb) <sub>N</sub>	6.31	7.50	6.92	5.32	8.03	10.52	8.27	7.98	10.21	9.35		
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.75	1.92	1.84	1.76	1.69	2.31	1.72	1.75	1.83	1.77		
La/Yb	14.4	11.9	16.1	12.3	15.6	20.8	17.6	15.0	19.8	21.1		
La/Sm	6.46	5.16	6.63	6.01	5.79	5.86	6.93	5.43	6.43	7.75		
Ce/Yb	24.4	29.0	26.7	20.5	31.0	40.6	31.9	30.8	39.4	36.1		
Eu/Yb	0.61	0.67	0.61	0.56	0.71	0.79	0.66	0.72	0.80	0.69		

注:由国家地质实验测试中心测定。数据 Y3、Y27、Y32、BAN1、76/116、142/106、1、2 引自邵拥军等<sup>[6,7,25]</sup>。FH-2、FH-5、FH-30、FH-31、Y3、Y27、Y32、BAN1 为石英二长闪长岩,76/116、142/106 为花岗闪长岩,1-中国石英闪长岩平均值,2-中国花岗闪长岩平均值。

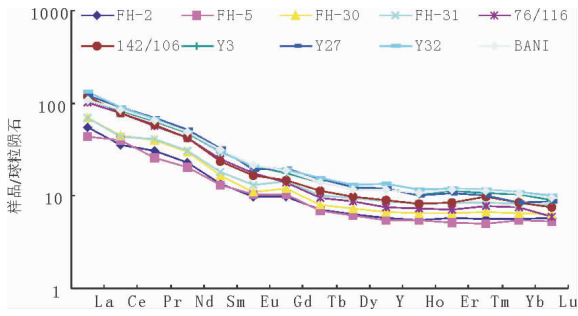


图 4 新屋里岩体石英二长闪长岩和花岗闪长岩稀土元素配分图解

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of Xinwuli pluton quartz monzodiorite and granodiorite

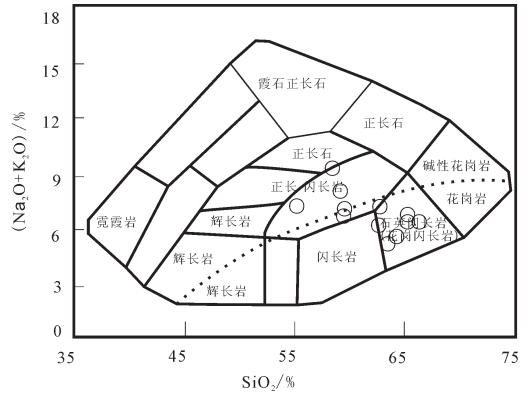


图 5 新屋里岩体 (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) - SiO<sub>2</sub> (TAS) 图解  
Fig.5 SiO<sub>2</sub>-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) (TAS) correlation diagram of Xinwuli pluton

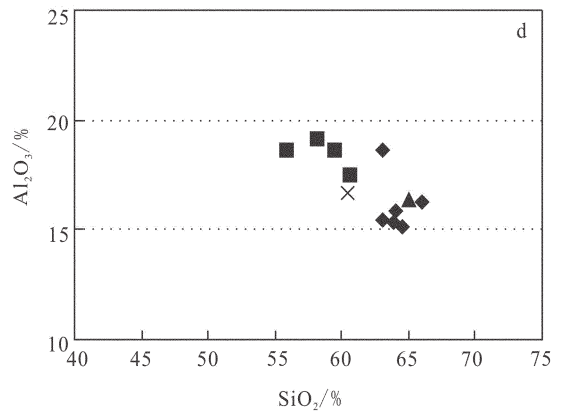
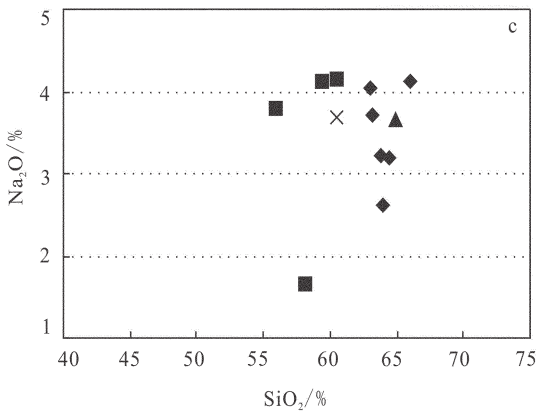
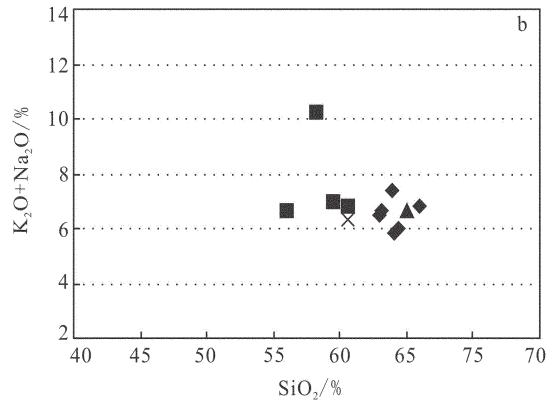
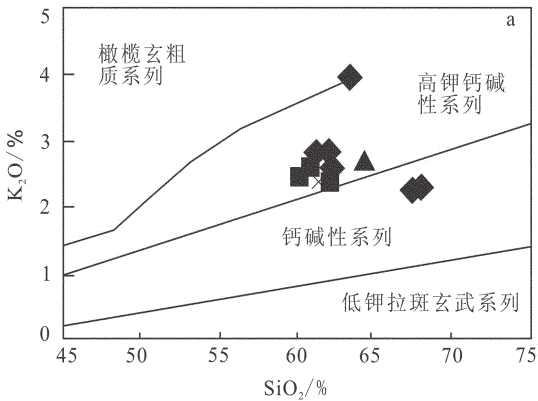


图 6 新屋里岩体常量元素图解

◆—花岗闪长岩; ■—石英二长闪长岩; ▲—中国花岗闪长岩平均值; ×—中国石英闪长岩平均值

Fig.6 Hark diagrams of Xinwuli pluton

◆—Granodiorite; ■—Quartz monzodiorite; ▲—Average value of granodiorite in China; ×—Average value of quartz diorite in China

Ba,新屋里岩体石英二长闪长岩和花岗闪长岩富集Th,岩浆可能来源于深部上地幔。Barbarin<sup>[29]</sup>认为混合钙碱性岩可分为 KCG 和 ACG 两类,KCG 贫 CaO、富 K<sub>2</sub>O,主要来源于地壳;ACG 贫 K<sub>2</sub>O、富

CaO,主要来源于地幔。石英二长闪长岩 CaO 含量平均值为 5.52%、K<sub>2</sub>O 含量平均值为 3.08%,本区岩浆岩主要来源于地幔。Sc、Co 和 Ni 亏损,其分布曲线在局部具有较大差异并且出现个别曲线穿插其他



曲线的现象, 岩浆形成过程复杂。石英二长闪长岩 CaO 含量平均值 5.52% 高于中国石英二长闪长岩平均值 3.70%, 花岗闪长岩 CaO 含量平均值 3.95% 低于中国花岗闪长岩平均值 4.68% (表 1), 说明岩体在成岩过程中经受了钙质围岩的同化混染。而侵入岩的全碱、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 无相关性 (图 6), 进一步证明岩浆侵入过程中岩体与围岩曾发生同化混染作用。

Treuil 和 Joron<sup>[30]</sup> 研究认为, 在 La-La/Sm 关系图上, 部分熔融过程表现为一条斜线, 分离结晶过程表现为一条水平线, 新屋里岩体岩石样品 La-La/Sm 投点分散 (图 8), 表明岩浆演化过程不是单一的部分熔融过程或分离结晶过程, 而有可能是岩浆演

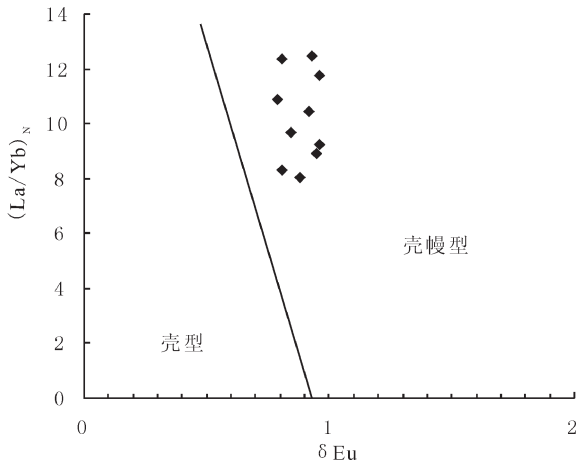


图 7 新屋里岩体  $\delta Eu - (La/Yb)_N$  关系图  
Fig.7  $\delta Eu - (La/Yb)_N$  correlation diagram of Xinwuli pluton

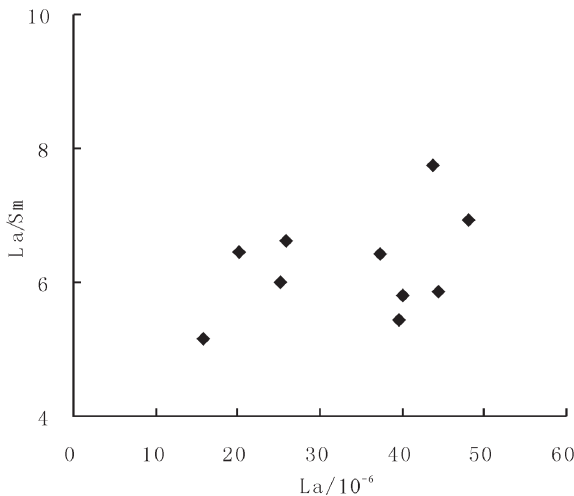


图 8 新屋里岩体 La-La/Sm 关系图  
Fig.8 La-La/Sm correlation diagram of Xinwuli pluton

化过程中发生同化混染作用。Pearce<sup>[31]</sup> 研究认为, 若 Eu/Yb-Ce/Yb 呈明显的线性关系, 则岩体的形成过程以混合作用为主; 否则以分离结晶和部分熔融作用为主。新屋里岩体石英二长闪长岩和花岗闪长岩 Eu/Yb-Ce/Yb 投影点基本上呈现线性分布 (图 9), 其拟合方程为  $Ce/Yb = 75.594 \times Eu/Yb - 20.482$ , 相关系数 0.936, 显示明显的线性相关性, 充分说明岩浆演化过程中有外来物质加入, 成岩过程以混合作用为主, 外来物质可能是在地幔部分熔融或岩浆上侵过程中混入的围岩。Tarney<sup>[32]</sup> 研究认为高 Ba-Sr 花岗岩可能与岩石圈俯冲、岩石圈地幔受到碳酸盐流体的交代富集或者富集 Ba、Sr 的基性岩浆的底侵作用有关。新屋里岩体石英二长闪长岩具有高 Ba ( $353 \times 10^{-6} \sim 864 \times 10^{-6}$ )、Sr ( $381 \times 10^{-6} \sim 495 \times 10^{-6}$ ) 特征, 岩浆来源于上地幔富集 Ba、Sr 的碱性玄武岩。印支期板块碰撞造山使扬子地区的上地壳发生褶皱, 逆冲断裂发育, 地壳缩短、加厚, 由于等温降压使上涌热幔发生部分熔融分出大量 (富碱质的) 玄武质岩浆<sup>[33]</sup>。经球粒陨石<sup>[34]</sup> 标准化的稀土配分曲线 (图 4),  $(La/Sm)_N$  值变化于  $3.25 \times 10^{-6} \sim 4.33 \times 10^{-6}$ , 平均  $3.93 \times 10^{-6}$ , 说明重稀土分馏程度较低, 衰减速度比轻稀土慢。 $\delta Eu$  值为 0.79~0.96, 呈现弱的负 Eu 异常, 说明花岗闪长岩分异演化不强, 可能具有深源同熔型花岗岩的成因特征<sup>[35,2]</sup>。花岗岩类 Eu 呈现负异常是形成时陆壳物质混染的反映<sup>[36]</sup>, 新屋里岩体显示出弱的负 Eu 异常 (图 4), 也说明侵入岩岩浆属壳幔混合型, 原始岩浆来源于上地幔碱性玄武岩浆并有陆壳物质混染。

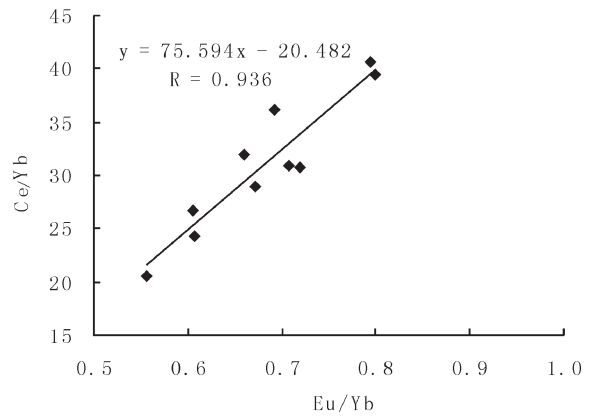


图 9 新屋里岩体 Eu/Yb-Ce/Yb 关系图  
Fig.9 Eu/Yb-Ce/Yb correlation diagram of Xinwuli pluton



花岗岩类岩石的不同来源在稀土配分曲线模式上的反映是:幔源岩浆具有轻稀土富集、重稀土亏损的右倾曲线特征<sup>[2]</sup>。新屋里岩体侵入岩配分曲线均为右倾型(图 4),轻稀土的分馏程度比重稀土高,(La/Yb)<sub>N</sub> 为 8.02~12.5,说明原始岩浆来源于上地幔,但在岩浆不断侵位形成过程中有地壳物质加入,属壳幔混合型。

矿区构造主要为前印支期东西向基底断裂和燕山晚期北北东向断裂构造。燕山晚期大规模北北东向断裂活动诱发了前印支期东西向基底断裂进一步活动,向下深切上地幔(36~38 km 以下),向上切割盖层并与北北东向断裂沟通<sup>[37]</sup>。印支期板块碰撞造山使扬子地区上地壳发生褶皱,等温降压使地幔发生部分熔融,分异出大量碱性玄武质岩浆<sup>[33]</sup>。来自上地幔的碱性玄武岩岩浆沿东西向基底断裂上侵,当其上升到地壳时,同化硅质围岩,使原始岩浆组分重新调整,上侵至硅铝质的上地壳深处地壳细圈层之间的滑脱构造带时就位形成深部岩浆房,在燕山晚期北北东向左旋剪切应力场和自身热气球膨胀机制的联合控制下上升到近地表,形成本区高钾钙碱性小岩株。

#### 4.2 岩体与成矿的关系

翟裕生等<sup>[2]</sup>认为长江中下游地区岩浆控制成矿有两种方式:①提供矿质和成矿流体,在岩浆及其流体的分异演化过程中成矿;②原有矿层(或矿源层)受岩浆的热能和热液叠加改造而形成层控矿床或层控矽卡岩矿床等。铜陵矿集区分布高钾钙碱性系列和橄榄安粗岩系列两种中酸性侵入岩<sup>[38]</sup>,新屋里岩体为高钾钙碱性侵入岩,其岩浆活动与铜矿的形成具有密切的时间、空间和成因联系。

新屋里岩体形成于晚侏罗世,岩浆侵入活动发生在燕山晚期。锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(144.2±2.3)Ma<sup>[17]</sup>,矿体中方铅矿同位素年龄为 113 Ma<sup>①</sup>,方铅矿形成于退化矽卡岩期后的石英硫化物阶段,主矿体是在岩浆岩侵入稍晚形成并早于方铅矿形成时间。

石英二长闪长岩和花岗闪长岩岩体是控制区内铜矿的最主要因素。邵拥军<sup>[25]</sup>认为对矿化最为有利的是小岩株,凤凰山铜矿区内岩体主要呈岩株状产出,岩浆岩的形态对矿化富集有一定的控制作用。矿

体分布于岩体与大理岩的接触带上,岩体中铜含量较高(图 11),李进文等<sup>[18]</sup>认为与成矿有关的侵入岩 Cu 含量一般高于或远高于中酸性岩维氏值( $20 \times 10^{-6} \sim 35 \times 10^{-6}$ ),新屋里岩体石英二长闪长岩 Cu 含量平均值为  $273.4 \times 10^{-6}$ ,远远大于中酸性岩维氏值,显示出明显的富集性,与成矿关系密切。微量元素蛛网图中石英二长闪长岩、矽卡岩和大理岩的分布曲线一致(图 3),表明侵入岩与成矿有着密切的成因联系。矿石和闪长岩中大部分微量元素含量接近,说明成矿物质主要来自闪长岩岩体(表 2),其中,部分微量元素含量在矿石和闪长岩中存在着差异,其差异是岩浆流体与碳酸盐地层交代作用的结果。矽卡岩化和大理岩化广泛发育,显示了岩体与围岩强烈的交代作用,是矽卡岩型矿床的典型标志。区内地层-岩性直接控制着矽卡岩化的发育程度,矽卡岩的含矿性与围岩岩性有很大的关系,与南陵湖组石灰岩接触带形成的铁铝石榴子石为主的块状矽卡岩对成矿有利,而与和龙山组条带状灰岩接触带形成的条带状矽卡岩与角岩互层者成矿较差。

矿体的空间分布受构造变形—岩浆侵入高温高压作用的双重控制,矿化作用是多期次的,经历了从高温矽卡岩阶段到中低温热液阶段并以岩浆热液为主的复合型成矿作用,矿体形态及成矿富集明显受接触带和构造带制约。矿区铜矿主要产出于岩体周边的接触带,接触带的产状与复杂程度决定着矿体的规模。而成岩成矿前的断裂构造带受岩浆侵

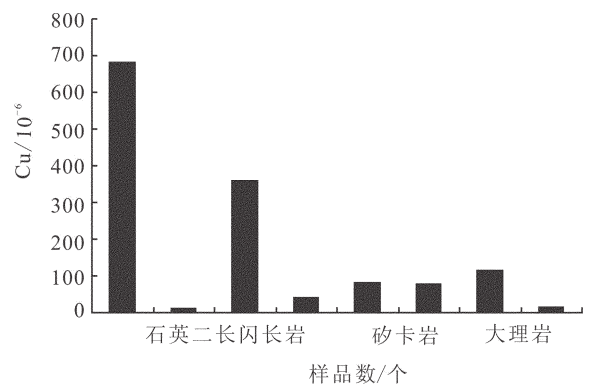


图 10 凤凰山铜矿床 Cu 含量分布直方图  
Fig.10 Histogram showing the distribution of Cu in quartz monzodiorite, skarn and marble of the Fenghuangshan Cu deposit

①安徽省地质矿产局 321 地质队. 凤凰山设计正文, 2006.

表 2 凤凰山石英二长闪长岩、矽卡岩和大理岩微量元素分析结果(10<sup>-6</sup>)  
Table 2 Trace element compositions of quartz monzodiorite, skarn and marble in Fenghuangshan (10<sup>-6</sup>)

样品原号	FH-2	FH-5	FH-30	FH-31	FH-11	FH-14	FH-16	FH-25	FH-41
Cu	682	11.6	360	40.0	81.3	79.4	118500	116	16.2
Cr	16.2	14.9	19.2	9.89	15.1	47.4	14.0	4.87	10.3
Co	7.52	6.23	10.0	8.68	8.20	7.62	21.7	3.07	4.25
Ni	15.8	7.17	9.88	7.48	7.96	17.3	32.4	18.4	23.7
Sc	5.26	5.62	6.08	5.27	8.88	7.68	3.86	2.65	3.16
Rb	46.3	51.7	79.0	36.4	67.7	75.0	2.40	2.40	2.89
Sr	411	381	418	495	359	258	104	5819	3483
Nb	12.8	14.6	12.2	12.5	12.3	7.85	1.60	0.62	0.98
Ba	353	416	794	864	733	77.9	422	68.5	37.2
Ta	1.18	1.41	1.12	1.13	1.04	0.56	0.24	0.07	0.11
Th	11.9	10.6	8.52	8.58	7.94	3.00	1.44	0.71	0.99
U	1.47	1.16	2.54	2.42	2.36	2.55	3.79	2.06	2.66
Zr	171	190	173	140	150	200	16.9	6.49	10.4
Hf	4.57	5.01	4.42	3.88	3.89	1.83	0.53	0.19	0.27
V	63.5	70.5	78.0	66.2	101	42.9	16.3	4.41	6.10
Ti	3514	3902	3607	3457	4858	2664	577	206	318
Y	12.2	11.6	14.2	18.5	16.7	6.61	2.26	2.10	2.65

注:由国家地质实验测试中心测定。FH-2、FH-5、FH-30、FH-31 为石英二长闪长岩, FH-11、FH-14、FH-16 为矽卡岩, FH-25、FH-41 为大理岩。

入时发生流变褶皱、韧性剪切与脆性破裂作用,为含矿热液流体沉淀富集形成了良好的空间条件,沿接触带内凹以及流变褶皱部位是形成富矿体的有利地段。虽然主要的矿体都位于接触带上,但是,矿体的形成及定位并非简单地受接触带构造控制,而是受与接触带套合的断裂构造控制,形成角砾状矿石。控矿断裂系追踪两组共轭断裂而形成的,其形成受区域构造应力场和岩体冷却形成的局域应力场的共同控制。向岩体内凹的接触带是两组共轭断裂的交叉部位,也是最大的扩容构造空间,形成厚大矿体。

## 5 结 论

(1) 新屋里岩体岩石类型为石英二长闪长岩和花岗闪长岩,属于高钾钙碱性系列。其岩浆属于幔壳混合型,原始岩浆来源于上地幔碱性玄武岩区,并且与地壳物质混染。

(2) 岩体成岩过程以混合作用为主,外来物质可能是在地幔部分熔融过程中加入的,也可能是在岩

浆上侵过程中加入的。

(3) 凤凰山铜矿与新屋里岩体有着密切的时空和成因联系。石英二长闪长岩和花岗闪长岩是控制区内铜矿形成的最主要因素,成矿物质主要来自岩体。铜矿形成稍晚于岩浆岩侵入事件。矿体分布于岩体与大理岩接触带内矽卡岩带上。

(4) 成矿以岩浆期后热液为主,并经历了从高温矽卡岩阶段到中低温热液阶段的复合型成矿作用。

致谢:感谢安徽省地勘局 321 地质队和凤凰山铜矿工作人员对野外工作的大力支持和帮助。

## 参考文献(References):

- [1] 常印佛,刘湘培,吴言昌.长江中下游铁铜矿成矿带[M].北京:地质出版社,1991:1-379.  
Chang Yinfu, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. Fe-Cu Metallogenic Belt in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:1-379(in Chinese).
- [2] 翟裕生,姚书振,林新多,等.长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M].北京:地质出版社,1992:1-234.

- Zhai Yusheng, Yao Shuzheng, Lin Xinduo, et al. Metallogenic Regularity of Fe-Cu (-Au) in the Middle-Lower Reaches of the Yangtze-River Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-234 (in Chinese with English abstract).
- [3] 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-351.
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, et al. Geology of Copper-Gold Polymetallic Deposits in the along-Yangtze River Area of Anhui Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-351 (in Chinese).
- [4] 毛景文, 华仁民, 李晓波. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区 [J]. 矿床地质, 1999, 18: 39-43.
- Mao Jingwen, Hua Renmin, Li Xiaobo. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits [J]. Mineral Deposits, 1999, 18: 39-43 (in Chinese with English abstract).
- [5] 刘亮明, 王志超, 彭省临. 综合信息论在储量危机矿山深部找矿中的应用—以铜陵凤凰山铜矿为例 [J]. 地质科学, 2002, 37(4): 444-452.
- Liu Liangming, Wang Zhichao, Peng Shenglin. Application of comprehensive informationism prediction for ore prospecting in deeper and outer of mines with critical reserves: an example from the Fenghuangshan copper mine, Tongling [J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(4): 444-452 (in Chinese with English abstract).
- [6] 邵拥军, 彭省临, 刘亮明, 等. 凤凰山矿田成矿地质条件和控矿因素分析 [J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003, 34(5): 562-566.
- Shao Yongjun, Peng Shenglin, Liu Liangming, et al. Analysis of the geological conditions of mineralization and the ore-control factors in Fenghuangshan field [J]. J. Cent. South Univ. Technol., 2003, 34(5): 562-566 (in Chinese with English abstract).
- [7] 邵拥军, 彭省临, 吴淦国, 等. 铜陵凤凰山岩体成岩机制探讨 [J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 39-43.
- Shao Yongjun, Peng Shenglin, Wu Ganguo, et al. The analysis on the rock-forming mechanism of Fenghuangshan rock body in Tongling area [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(5): 39-43 (in Chinese with English abstract).
- [8] 杨中宝, 丁美青, 银霞. 岩浆侵位过程的反演及其在矿体定位预测中的应用—以安徽铜陵凤凰山矿田为例 [J]. 世界地质, 2003, 22(4): 339-343.
- Yang Zhongbao, Ding Meiqing, Yin Xia. Magmatic emplacement process inversion and its application to location prediction of orebody [J]. Global Geology, 2003, 22(4): 339-343 (in Chinese with English abstract).
- [9] 邓军, 王庆飞, 黄定华, 等. 铜陵矿集区燕山期地壳浅部成矿流体活动的构造控矿 [J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 399-404.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Huang Dinghua, et al. Structural control of ore-forming fluid activities in shallow crust of Tongling ore concentration area in Yanshanian period [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(3): 399-404 (in Chinese with English abstract).
- [10] 闻广, 吴思本. 安徽铜陵凤凰山岩体若干特征与成矿关系 [J]. 中国地质科学院院报, 1983, (7): 343-349.
- Wen Guang, Wu Siben. Some characteristics of the Fenghuangshan Intrusion and its affinity to mineralization [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1983, 7: 343-349 (in Chinese with English abstract).
- [11] 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 5(4): 299-306.
- Wu Cailai, Zhou Xunrou, Huang Xuchen, et al. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar chronology of intrusive rocks from Tongling [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 1996, 5(4): 299-306 (in Chinese with English abstract).
- [12] 狄永军, 赵海玲, 张贻全, 等. 安徽铜陵地区燕山期花岗岩类岩石中的岩浆混合结构 [J]. 北京地质, 2003, 15(1): 12-17.
- Di Yongjun, Zhao Hailing, Zhang Yiquan, et al. Petrographic evidences for magma mixing in the granitoids from Tongling area, Anhui Province [J]. Beijing Geology, 2003, 15(1): 12-17 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王庆飞, 邓军, 黄定华, 等. 铜陵矿集区浅层隐伏岩体预测及其形态分析 [J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 405-410.
- Wang Qingfei, Deng Jun, Huang Dinghua, et al. Prognosis and morphological analysis of subsurface concealed magmatic bodies in Tongling ore concentration area [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(3): 405-410 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王元龙, 王焰, 张旗, 等. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地质地球化学特征及其成矿—地球动力学意义 [J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 325-338.
- Wang Yuanlong, Wang Yan, Zhang Qi, et al. The geochemical characteristics of Mesozoic intermediate-acid intrusives of the Tongling area and its metallogenesis-geodynamic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2): 325-338 (in Chinese with English abstract).
- [15] 毛政利, 赖健清, 彭省临, 等. 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, 2004, 40(2): 28-31.
- Mao Zhengli, Lai Jianqing, Peng Shenglin, et al. The chemical characteristics and significances of the Fenghuangshan copper deposit in Tongling, Anhui Province [J]. Geology and Prospecting, 2004, 40(2): 28-31 (in Chinese with English abstract).
- [16] 杜杨松, 秦新龙, 田世洪. 安徽铜陵铜官山矿区中生代岩浆—热液过程: 来自岩石包体及其寄主岩的证据 [J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 339-350.
- Du Yangsong, Qin Xinlong, Tian Shihong. Mesozoic magmatic to hydrothermal process in the Tongguangshan ore field, Tongling, Anhui province, China: evidence from xenoliths and their hosts [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(2): 339-350 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张达, 吴淦国, 狄永军, 等. 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——中国地质大学学报, 2006, 31(6): 823-829.
- Zhang Da, Wu Ganguo, Di Yongjun, et al. Emplacement dynamics of Fenghuangshan pluton (Tongling, Anhui Province): constraints from U-Pb SHRIMP dating of zircons and structural deformation

- ]]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2006, 31(6):823-829 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李进文, 裴荣富, 张德全, 等. 铜陵矿集区燕山期中酸性侵入岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地球学报*, 2007, 28(1):11-22.  
Li Jinwen, Pei Rongfu, Zhang Dequan, et al. Geochemical characteristics of the Yanshanian intermediate-acid intrusive rocks in the Tongling mineralization concentration area, Anhui Province, and their geological implications [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2007, 28(1):11-22 (in Chinese with English abstract).
- [19] 刘文灿, 高德臻, 储国正. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测[M]. 北京:地质出版社, 1996:1-133.  
Liu Wencan, Gao Dezhen, Chu Guozheng. The Analysis of Structure Deformation and the Metallogenic Prediction in the Middle and Lower Yangtze Reaches [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:1-133 (in Chinese).
- [20] 张达, 李东旭. 铜陵凤凰山岩体侵位构造变形特征[J]. *地球学报*, 1999, 20(3):405-410.  
Zhang Da, Li Dongxu. Study of characteristics of structural deformation with the emplacement of Fenghuangshan pluton, Tongling, Anhui [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1999, 20(3):405-410 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张达, 吴淦国, 李东旭. 铜陵凤凰山岩体接触带构造变形特征[J]. *地学前缘*, 2001, 8(3):223-229.  
Zhang Da, Wu Ganguo, Li Dongxu. Characteristics of contact structural deformation of Fenghuangshan pluton in Tongling, Anhui Province [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(3):223-229 (in Chinese with English abstract).
- [22] 吴淦国, 张达, 臧文栓. 铜陵矿集区构造滑脱及分层成矿特征研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(4):300-308.  
Wu Ganguo, Zhang Da, Zang Wenshuan. Study on tectonic layering movement and layering mineralization in the Tongling metallogenic cluster [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(4):300-308 (in Chinese).
- [23] 李进文, 裴荣富, 梅燕雄. 铜陵矿集区矿田构造垂直分布[J]. *矿床地质*, 2004, 23(2):206-215.  
Li Jinwen, Pei Rongfu, Mei Yanxiong. Vertical zoning of orefield structures in Tongling ore concentration area, Anhui Province [J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23(2):206-215 (in Chinese with English abstract).
- [24] 邵拥军, 彭省临, 赖健清, 等. 凤凰山铜矿床两类成矿岩体的厘定及其成因分析[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10):2471-2482.  
Shao Yongjun, Peng Shenglin, Lai Jianqing, et al. Identification of two mineralized intrusion in the Fenghuangshan copper deposit and analysis of their genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10):2471-2482 (in Chinese with English abstract).
- [25] 邵拥军. 安徽铜陵凤凰山矿田成岩成矿机制及隐伏矿体预测分析[D]. 中南大学, 2002:1-90.  
Shao Yongjun. The Predicting Analysis on the Rock-forming Mechanism and Concealed Orebody of the Fenghuangshan Rock Body in Tongling area [D]. Central South University, 2002:1-90 (in Chinese with English abstract).
- [26] 毛政利. 凤凰山铜矿数字矿床模型及其预测系统开发研究[D]. 中南大学, 2004:1-103.  
Mao Zhengli. The Research of Digital Mineral Deposit Model and Development of Metallogenesis Prediction System of Fenghuangshan Copper Deposit [D]. Central South University, 2004:1-103 (in Chinese with English abstract).
- [27] Le Mritre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms [M]. Blackwell, Oxford, 1989:1-24.
- [28] Brown G C, Thorpe R S, Webb P C. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources [J]. *Journal of the Geological Society*, 1984, 141:413-426.
- [29] Barbarin B. A review of the relationship between granitoid types, their origins and their geodynamic environments [J]. *Lithos*, 1999, 6:483-492.
- [30] Treuil M, Joron J L. Utilisation des elements hygromagmatophiles pour la simplification de la modalisation quantitative des processus magmatiques: Exemple de l'Afar et de la dorsale medio Atlantique: Soc [J]. *It. Mineral. Et Perol.*, 1975, 31:125-174.
- [31] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [C]//Thorpe R S, ed. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester: Wiley, 1982:525-548.
- [32] Tarney J. Trace element geochemistry of orogenic igneous rocks and crustal growth models [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1994, 151:855-868.
- [33] 邓晋福, 叶德隆, 赵海玲, 等. 下扬子地区火山作用深部过程与盆地形成[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1992:1-184.  
Deng Jinfu, Ye Delong, Zhao Hailing, et al. *Volcanism Deep Internal Progresses and Basin Forming in the Lower Reaches of the Yangtze River* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992:1-184 (in Chinese).
- [34] Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Blackwell, Oxford, 1985:1-311.
- [35] 刘英俊, 曹励明. *元素地球化学导论* [M]. 北京:地质出版社, 1987:1-281.  
Liu Yingjun, Cao Liming. *Elemental Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987:57-80 (in Chinese).
- [36] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根柱构造—大陆动力学的钥匙[M]. 北京:地质出版社, 1996:1-110.  
Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. *Continental Roots—Plume Tectonics of China: Key to Continental Dynamics* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:1-110 (in Chinese).
- [37] 陈沪生. 扬子准地台下扬子盆地 HQ-13 线地球物理—地质综合解释纲要 [C]//中国南方油气勘查新领域探索论文集 (第 2 辑). 北京:地质出版社, 1988:1-173.  
Cheng Husheng. The essentials of geological geophysical integrated interpretation of the Line HQ-13 in the Lower Yangtze basin on the Yangtze Metaplatform [C]//Collected Papers on New Fields of



Hydrocarbon Exploration in Southern China (Series 2). Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1–173 (in Chinese).

[38] Wu Cailai, Wang Zhihong, Qiao Dewu, et al. Types of enclaves

and their features and origins in intermediate–acid intrusive rocks from the Tongling district, Anhui province, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(1): 54–67.

## Geochemical characteristics of the Fenghuangshan Yanshanian intermediate–acid intrusive rocks in Tongling, Anhui Province, and their relationship with the metallogenic process

QU Hong–ying<sup>1,2,4</sup>, PEI Rong–fu<sup>1</sup>, LI Jin–wen<sup>1</sup>, WANG Yong–lei<sup>1</sup>, DENG Yue–jin<sup>3</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China; 4. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

**Abstract:** The Fenghuangshan copper deposit is the largest skarn type Cu deposit in the Tongling polymetallic (Cu, Fe, Au) ore cluster area. The Xinwuli pluton in the ore district is a Late Yanshanian high–K calc–alkaline intrusion (with U–Pb zircon age of 144 Ma), which is composed of quartz monzodiorite envelope and granodiorite interior part. Geochemical characteristics of the Xinwuli quartz monzodiorite indicate that the original magma was upper mantle alkali basalt, which was contaminated by crust materials during the intrusion. Crust material contamination might have happened during partial melting or upward migration of the magma. Cu mineralization has close spatial, temporal and genetic relationship with the Xinwuli pluton. Ore bodies are hosted by both quartz monzodiorite and marble along the contact zone, with endoskarn ore bodies being dominant. Similar trace element features of ore samples and quartz monzodiorite indicate that copper might have been derived from the monzodiorite intrusion. Fluid bimetasomatism between quartz monzodiorite and carbonate rocks caused Cu precipitation. Ore bodies are jointly controlled by bimetasomatism and structural deformation in three–dimensional distribution, resulting in the distribution of breccia ores along the contact zones. The whole mineralization history can be classified into the high temperature skarn stage and the middle–low temperature hydrothermal stage.

**Key words:** high–K calc–alkaline rock; Xinwuli pluton; rock geochemistry; Fenghuangshan Cu deposit; Tongling

**About the first author:** QU Hong–ying, female, born in 1978, doctor candidate, majors in mineral resources exploration; E–mail: hongyingqu@126.com.