

武夷山成矿带桃溪环形构造区典型矿床成矿背景

陈世忠 黄正清 朱筱婷 陈 刚 马 明

(中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要:武夷山成矿带发育大量的环形构造,桃溪环形构造位于成矿带南部。沿环形构造周边分布大量的大中型铜多金属矿,紫金山铜金矿、岩背锡矿和红山铜矿是其代表。这些矿床成矿年龄集中于 125~90 Ma,与桃溪环形带上大多数矿床一样表现为斑岩型-岩浆热液型铜多金属矿成矿特征。紫金山、岩背和红山矿床的成矿斑岩体成岩年龄 94~133 Ma,多为燕山期复式杂岩体中晚期,是中生代晚期壳幔作用的产物。桃溪环形构造是构造作用和岩浆作用的结果,并导致了与构造和岩浆相关的成矿作用。

关键词:桃溪环形构造;武夷山成矿带;紫金山铜金矿;成矿斑岩

中图分类号:P617 **文献标志码:**A **文章编号:**1100-3657(2013)05-1569-14

1 引言

桃溪环形构造区曾被称为桃溪旋卷构造、桃溪穹隆、会昌环形构造、桃溪变质核杂岩桃溪隆起区等^[1],位于华南板块的东部,武夷山成矿带南段。该地区长期以来构造活动强烈,经历了加里东、海西、印支和燕山期构造事件。燕山晚期岩浆活动和成矿作用强烈,被称为“岩浆大爆发”^[2]或“中生代岩浆-成矿大爆发”^[3]。

武夷山成矿带已发现 110 多种矿产,探明储量矿产 60 多种,大中型矿床数百处。武夷山成矿带南段桃溪环形构造区是锡、钨、铜、银、铅、锌、金成矿富集区,已知有金、银、铜、铅、锌、钨、锡、钼、锰、铍、铀、铌钽、稀土等金属矿产,其中金、铜、锡、钨等形成大型或特大型矿床,如紫金山铜金矿、岩背锡矿、红山铜矿等矿床。这些矿床是武夷山成矿带(图 1),乃至东南沿海地区具有代表性的矿床。

桃溪环形构造区已发现铜、金、铅、锌、铁、锰矿床(点)50 余处,其中特大型铜金矿床 1 处(紫金山)、锡矿 1 处(岩背)(图 2)。该区内铜金矿主要矿床类型有高硫浅成低温热液型铜金矿床、斑岩型铜

金矿床、中低温热液型铜金(银)矿床和矽卡岩型铁铜多金属矿床。矿床具有成群分布的特点,最典型的矿化富集区为紫金山矿田,矿化以紫金山超大型铜金矿床为中心,周边有铜矿沟、罗卜岭、中寮、五子骑龙、新屋下、二庙沟、龙江亭、悦洋、大岌岗等一系列中小型矿床和矿(化)点,它们之间存在密切的成因联系,现已成为一个整装勘查区。

紫金山铜金矿矿田位于桃溪环形构造东侧。紫金山在 1993 年探获铜资源量 129 万 t,平均品位 1.08%,达特大型;1994 年批准金储量 5.45 t,平均品位 4.24 g/t。1995—2006 年,矿区属开采为主、勘查为辅阶段。2006 年底,按 0.15×10^{-6} 进行生产圈矿,累计探明金金属量达到 305.3 t。2006 年之后,紫金山进入第二轮勘查高潮,新增铜金属量 41.69 万 t、金金属量 7.587 t、银金属量 168.7 t、钼金属量 0.6 万 t。同时,在罗卜岭等地的铜的找矿也取得了突破,探明铜金属量超过 50 万 t。

桃溪环形构造区矿床多分布在老变质岩附近,并表现出与燕山晚期岩浆活动密切相关的特征。部分矿体分布在岩浆隐爆角砾岩中(如红山、紫金山、铜坑璋),部分与火山机构关系密切(如岩背、中寮),

收稿日期:2012-10-16;改回日期:2013-05-20

基金项目:中国地质调查局“武夷山矿带铜多金属矿勘查选区评价项目”(1212010813065)资助。

作者简介:陈世忠,男,1967 年出生,研究员,岩石学矿物学矿床学专业,现从事矿产调查和成矿预测;E-mail:chenshizhong@gmail.com。

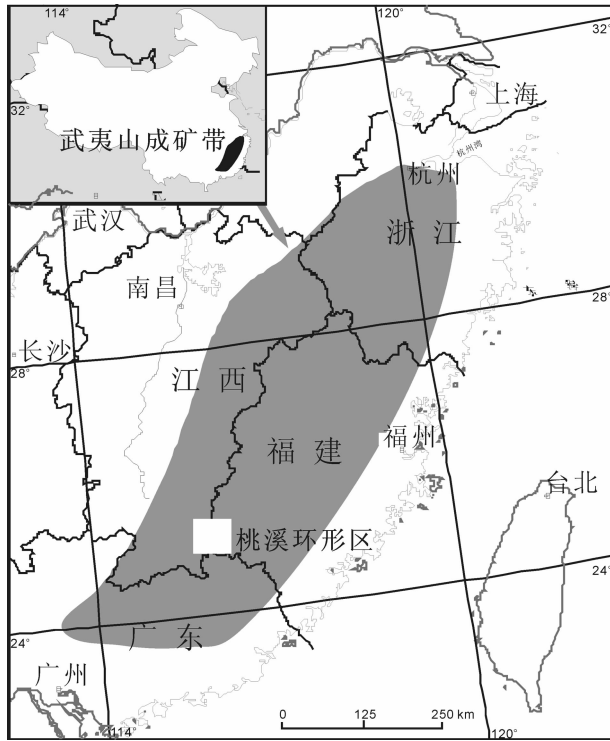


图 1 桃溪环形构造区位置图

Fig.1 Location of Taoxi circular region

部分与岩浆热液活动关系密切(如紫金山、铜矿沟、古石背)。部分矿体受断裂控制,但流体和成矿物质都有岩浆活动的痕迹(如牛轱远、麻州)。

该区部分典型矿床进行了较多的成因研究。如紫金山铜金矿^[4-6],岩背锡矿^[7-12]和红山铜矿^[13-16]等。研究内容主要针对矿床的地质特征、地球化学和矿床成因,以及与成矿有关的岩浆岩。紫金山、岩背和红山等典型矿床的成因争议较少,矿床的成因多与燕山晚期的岩浆活动有关,成矿构造是火山-次火山构造,矿石赋存最密切的岩石是次火山岩,包括侵入引起的隐爆角砾岩,主要成矿时期是燕山晚期。桃溪环形构造与矿床的密切关系,使相关地区有关专家从各个方面寻找其中的成矿规律,并进行成矿预测。马金清^[7]从变质核杂岩的角度认为查明桃溪印支期-燕山期的变质核杂岩对认识华南地壳演化和指导永梅会地区成矿规律总结意义重大。

研究表明,东南沿海成矿带内生矿床分布与前泥盆纪基底地层分布关系紧密,因此前震旦纪结晶基底及前泥盆纪变质褶皱基底地层常被认为是区内主要的矿源层,但是这些岩层大都是陆源碎屑岩变质而成^[18],岩石中含矿元素含量较低,多没有成为矿

源层的条件。本文旨在通过武夷山成矿带南段桃溪环形构造区典型矿床的成矿岩体特征研究,结合近年来的工作,论述桃溪环形构造区成矿大地构造背景,分析桃溪环形构造与矿产聚集的内在联系。

2 桃溪环形构造区地质背景

武夷山成矿带地处欧亚大陆东南缘的华南大陆东部,其西北侧紧邻扬子板块东南缘的江南古岛弧。大地构造分区属古华夏构造域,主体位于华夏板块中、浙闽粤活动带西部、武夷-云开褶皱带的北段,夹持于罗霄褶皱带和东南沿海中生代断陷之间,其北侧为钦(州)-钱(塘)结合带。武夷-云开褶皱带总体属构造隆起区,以前寒武纪结晶基底(变质核杂岩构造)广泛出露为特征。它是在华夏古陆基础上逐步演化而来的,经历华夏古陆的形成与裂解、扬子与华夏板块的碰撞拼合、太平洋板块向欧亚大陆板块的俯冲作用。中生代强烈的构造、岩浆、成矿作用,使其成为环西太平洋构造-岩浆-成矿带的重要成矿区带之一。

武夷山成矿带南段桃溪环形构造区(图 2)位于江西瑞金、会昌、寻乌,福建长汀、武平、上杭,广东平远等地。地质上位于武夷山隆起带南段,与南岭东西向印支隆起带重叠,东邻永(安)-梅(州)坳陷带,西邻赣南古生代被动陆缘。桃溪环形构造区曾被划为“桃溪旋卷构造”、“桃溪穹隆”^[19]及“会昌环形构造”^[20]。张顺金等^[20]认为桃溪环形构造为变质核杂岩构造,并进行了详细的论述。

桃溪环形构造区核部主要由元古宇桃溪岩组变质岩、少量古生代地层和中-新元古代、加里东期、印支期、燕山期侵入岩组成。桃溪岩组分布于长汀、会昌、武平一带,多被中生代复式岩体侵入或被中生代沉积盆地覆盖,大致围绕桃溪隆起呈半环状展布。

武夷山成矿带以基底变质岩大量出露(出露于石城、建宁、邵武和建瓯一带)为重要特征。这些变质岩一般被认为具有角闪岩相-绿片岩相的变质级^[19,21-23],而且具有新元古代以前的变质年龄^[24-26]。近年来研究显示,武夷山地区许多变质岩,包括桃溪环形构造区变质岩的原岩形成于新元古代以后(820~750 Ma)^[27,28],显然其变质作用也晚于新元古代。许多基底变质岩的变质作用主要发生在早古生代的加里东期,部分地区还叠加了海西期、印支期和燕山期的变质-变形作用^[29]。武夷山和桃溪环形区部分变质岩

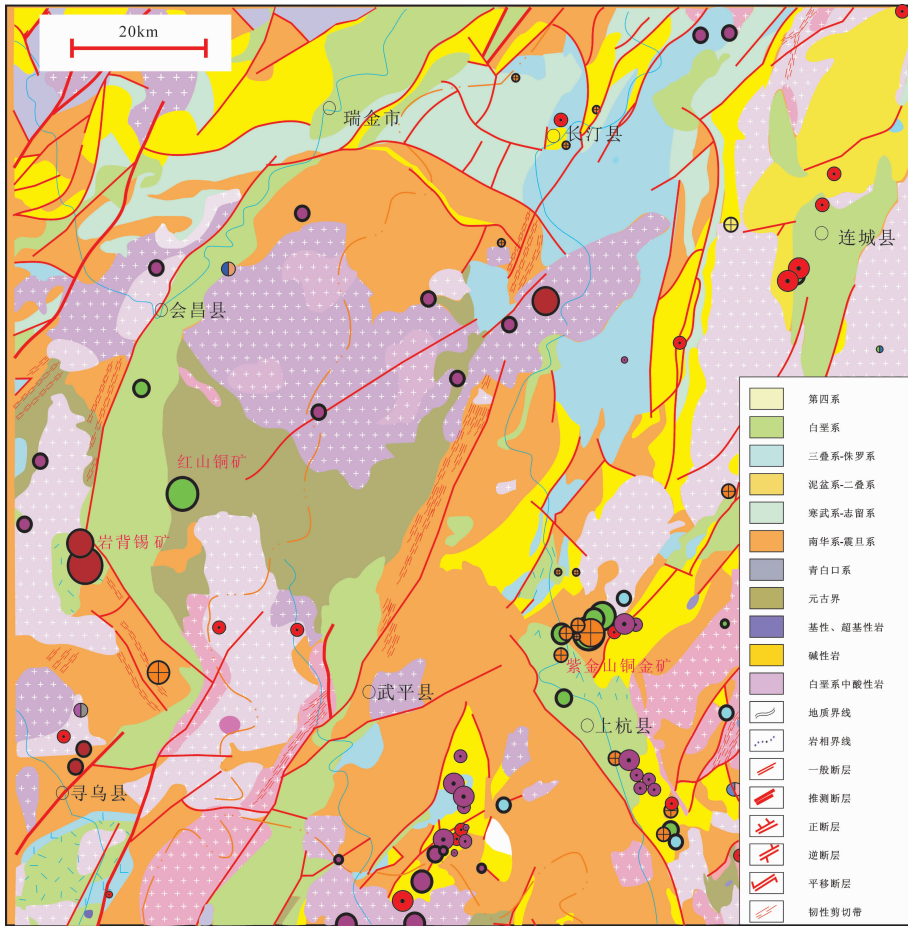


图 2 桃溪环形构造区地质矿产图

Fig.2 Sketch map of geology and mineral resources in Taoxi circular region

还经历了麻粒岩相的变质作用^[30,29]。这些变质相和变质作用的分布、变质类型、强度和伴随的岩浆活动都反映了武夷山不仅是古老的造山带，至中生代还表现为造山作用的特点。

桃溪环形构造区四周环形凹陷分布于会昌、瑞金、长汀、上杭等地，空间展布大致呈弧形，断续环绕内核展布，主要由中生界组成。部分早、晚白垩世地层呈弧形围绕基底岩层边部展布，中心隆起区东西两侧由中生代断陷沉积盆地组成。这些盆地相对于环内下降幅度较大，如连城黄坊白垩纪—新近纪地层厚 1229 m；连城庙前第四系厚 240 m；会昌周田盆地地层厚 3700 m。环形南部由扭性、压扭性弧形断裂组成，北部亦由一系列断裂呈北西向弧形展布。组成外环边界的构造对现代河流具有明显的控制作用，使主要河道绕环分布。沿弧形断裂还见有数个温泉出露。同时，据地震资料，环形构造周围地区，特别是沿环体

西部边缘的环形断裂带弱震比较频繁^[31]。由此可见，桃溪环形构造在近期仍有明显的活动性。此外，该隆起区中也发育大量燕山晚期的双峰式侵入岩和喷出岩^[13]。这些都说明，燕山晚期是桃溪环形构造、岩浆活动的重要时期。

3 桃溪环形构造区典型矿床成矿岩浆岩特征

武夷山成矿带位于环太平洋构造岩浆带西带，自晚太古代开始，各个地壳演化阶段均有岩浆活动。岩浆活动由老至新可以划分为 7 个主要期次：古元古代岩浆岩（2500~1800 Ma）、中元古代岩浆岩（1800~1000 Ma）、新元古代岩浆岩（1000~800 Ma）、加里东期岩浆岩（570~375 Ma）、海西—印支期岩浆岩（375~208 Ma）、燕山早期（208~145 Ma）和燕山晚期岩浆岩（145~65 Ma），特别是燕山期岩浆活动更

为强烈,构成西太平洋中新代火山岩带与华南花岗岩岩区的一部分。岩石类型包括超基性、基性、中性、中酸性、酸性岩石。

区内构造-岩浆岩行迹基本以 NE-NNE 向展布。总体上看,除零星出露的元古宙花岗岩表征前寒武系结晶基底的存在外,古生代花岗岩和早中生代花岗岩呈面式分布于区内。古生代的加里东期,以及早中生代的印支期花岗岩均缺乏同期的火山作用伴生,表明它们的成因与洋陆俯冲之间没有密切关系。而中侏罗世的火山岩浆作用拉开了华南晚中生代大规模岩浆作用的序幕,这一大规模岩浆作用,喷出和侵入相伴随,与区内很多矿床成矿活动相关,至晚白垩世告一段落。而新生代岩浆作用则仅仅表现为火山岩浆作用。

燕山晚期岩浆岩主要分布于政和—大埔断裂带以东的沿海地区,在其西部呈零星分布,桃溪区就是这些分布区之一。岩浆活动与晚侏罗世末期至早白垩世初期强烈侧向挤压转变为拉张阶段的断陷或塌陷作用有关。侵入活动相对较弱,常与早白垩世火山岩伴生,岩体受深部构造控制多呈复式岩体,常有较完整的由超基性—基性—酸性—碱性的岩浆演化系列,岩石类型复杂,有中酸性、酸性及超酸偏碱性,以酸性岩为主。分布上往往与 NW、NE 向断裂有关,多出现在构造结合部位。多呈复式岩体(深成岩体)产出或与同期火山岩共生,与其环状侵入体或中心侵入体共同组成火山—侵入杂岩。

武夷山成矿带内铜多金属矿床大多与燕山期的岩浆活动有着密切关系。铜矿和铅锌矿与壳幔同熔形成的花岗岩有关,如紫金山矿田和红山铜矿;另一部分矿床例如岩背锡矿则与地壳重熔型花岗岩有关。与岩浆有关的矿床成因类型有:斑岩型、火山热液型、火山沉积变质—热液改造型和接触交代型等。不同矿种和不同成因矿床常组成一个成矿系列。

现对桃溪隆起区东部上杭中生代火山盆地中紫金山成矿岩体和隆起区西部会昌中生代火山盆地中红山成矿岩体与岩背成矿岩体进行分析研究。

3.1 紫金山成矿岩体

紫金山高硫浅成热液矿目前已知延深超过 1500 m,矿田岩石普遍遭受蚀变,世界罕见,预示着深部巨大的找矿前景。紫金山高硫型(五子骑龙)、低硫型浅成低温热液矿床(碧田)和斑岩矿床(罗卜岭)共存于同一矿田的现象在中国尚属首例,也是世界

首次发现。

矿田位于上杭县城北 34 km 处,处于永梅拗陷西南,上杭白垩纪陆相火山断陷盆地东缘。紫金山火山—沉积地层主要是白垩系陆相火山沉积建造,沿北西向火山断陷盆地分布。高天钧等^[32]认为紫金山矿床在时空上连续演化,属同源岩浆在同一成矿场中不同演化阶段的产物;华仁民等^[33]则将紫金山地区的紫金山矿床划入中国东部晚中生代斑岩—浅成热液金(铜)成矿体系;张德全等^[34]把紫金山地区的绢云母—冰长石型浅成热液 Ag—Au 矿床、酸性硫酸盐型浅成热液 Cu—Au 矿床和斑岩 Cu(Mo)矿床归为以花岗闪长斑岩侵入体为中心的斑岩—浅成热液成矿系统之产物。这些认识基本一致,即认为紫金山晚中生代花岗岩与铜金矿化有关、火山—侵入杂岩与大规模的铜金成矿作用有关。

对紫金山岩浆岩前人进行了大量的研究。福建省第八地质大队(1991)(福建省上杭县紫金山地区地质成矿预测报告)在野外填图和钻孔资料的基础上,对紫金山各期次侵入岩进行了系统划分(表 1,2),本文在此基础上进行了补充。

紫金山酸性复式花岗岩体(四坊复式岩体)呈北东向沿桃溪核部分布,并遭受后期强烈的热液蚀变,是铜金矿主要容矿围岩,主要为中细粒花岗岩,是矿区分布最广的侵入体,也是最主要的赋矿围岩,中粗粒碎裂花岗岩和细粒白云母花岗岩零星出露。燕山晚期中酸性次火山相英安玢岩、隐爆角砾岩(图 3—A,B)、花岗闪长斑岩(罗卜岭岩体),沿紫金山火山通道侵位于早期的复式花岗岩体中,形成长 1.5 km,宽 0.5 km,长轴走向呈 NE 向的椭圆形复式岩筒;其顶部发育环状隐爆角砾岩带和震碎花岗岩带,两侧沿北西向裂隙带发育英安玢岩脉和热液角砾岩脉群。近火山口为受英安玢岩及隐爆角砾岩控制的大型紫金山铜金矿床;矿田的 NE 端和 SW 端,有受远离火山口的英安玢岩控制的中低温热液型铜金矿床;在火山机构的外围,如碧田地区,还有受浅成侵入体控制的银多金属矿化,包括受花岗斑岩控制的上杭古石背铀矿床。铜、金矿化主要分布于火山中心的顶部。英安玢岩深部过渡为花岗闪长斑岩,与斑岩型铜矿化关系密切。由它们组成的紫金山火山机构在平面上总体呈“蟹形”,是一个较完整的岩浆—气液活动体系。

四坊花岗闪长岩岩石稀土元素总量为 124.65~

表 1 紫金山各期次侵入体划分简表(据福建省第八地质大队资料修编)

Table 1 Various stages of intrusions in the Zijinshan orefield (modified after No. 8 Geological Party of Fujian Province)

期	阶段	代号		岩体名称	年龄/Ma
燕山晚期	$\gamma \delta^3_5$	四坊	罗卜岭	英安斑岩(超浅成相), 石英闪长斑岩(浅成)	102±9
	$\gamma \delta \mu^3_5$			花岗闪长斑岩	105±6 ^[35]
	$\gamma \delta^3_5$			花岗闪长岩	100±1 ^[35]
	$\lambda \pi^{3(1)a3}_5$		四坊	花岗斑岩、石英闪长玢岩	102±9 ^[35]
	$\gamma \delta^{3(1)a2}_5$			花岗闪长岩	105-108 ⁽²⁾
	$\eta \gamma^3_5^{(1)a1}$			仙师岩	似斑状黑云母二长花岗岩
燕山早期	$\eta \gamma^2_5^{(3)d}$	紫金山	才溪	似斑状中粗粒黑云母二长花岗岩	150±3 ⁽²⁾
	$\gamma^2_5^{(3)d}$			细粒白云母花岗岩	
	$\eta \gamma^2_5^{(3)c2}$			细粒花岗岩	
	$\eta \gamma^2_5^{(3)c1}$			中粒二长花岗岩	168±4 ⁽²⁾

注:(1)毛建仁等,2002;(2)赵希林等,2008。

表 2 紫金山地区断裂性质演化简表(据福建省第八地质大队资料修编)

Table 2 Development of faults in Zijinshan area (modified after No. 8 Geological Party of Fujian Province)

断裂方向	J ₃		K ₁		矿化特征
	早—中期	晚期	早期	晚期	
	$\gamma \delta^{2(3)c1} \rightarrow \eta \gamma \delta^{2(3)c1}$	$\gamma \delta^{2(3)d1}$	$\eta \gamma \delta^{3(1)a1}$	$\gamma \delta \delta^{3(1)a2}$	
NE 向	压扭→张	→ 扭→张	→ 压→张	→ 压扭	控矿构造
NW 向	张扭	→ 张	→ 压→张	→ 压→张扭	赋矿构造
近 WE 向		扭	→ 张	→ 压扭	存在矿化和异常
近 WE 向			扭	→ 张	影响不明显

136.71 μg/g, LREE/HREE 比值为 9.95~8.96, 属轻稀土元素富集型, 反映稀土元素分馏程度的(La/Yb)_N 比值较高, 为 12.49~9.83, 与 LREE/HREE 比值高是一致的; δEu 为 0.80~0.85。花岗闪长岩和花岗闪长斑岩的稀土元素配分曲线都呈略向右倾的平滑型, 二者曲线几乎重合而显示同源特征。花岗闪长岩类富集 Rb、Th、U、K, 贫 Ti、Nb、Ta、Ba、Sr、P, 显示活动大陆边缘钙碱性岩系的特征, 表明是幔源组分和中下地壳物质部分熔融形成的花岗质岩浆混合的结果, 岩石中有较多幔源组分的参与^[35]。

紫金山铜金矿床与中酸性次火山岩有密切的时空关系: 时间上, 成岩(花岗闪长斑岩 Rb-Sr 等时线年龄 105.1~110.9 Ma)与成矿(K-Ar 同位素年龄: 绢

云母 94 Ma, 明矾石 82~112 Ma, 蚀变钾长石 88.3 Ma, 蚀变黑云母 117.3 Ma)时间相近; 空间上, 蚀变矿化紧紧围绕次火山岩体分布。这表明成岩与成矿是岩浆演化产物, 即它们具有物源的一致性, Cu、Au 主要由中酸性岩浆带入。同时紫金山岩体、构造和矿体关系反映了成矿环境主要是拉张环境(表 2)。

3.2 红山成矿岩体

红山铜矿为斑岩-隐爆角砾岩型铜矿, 以往已作了较系统的研究。红山斑岩-隐爆角砾岩筒内的铜矿化十分普遍。据采场揭露, 矿体主要分布在斑岩、隐爆角砾岩与围岩接触破碎带处^[14,16]。这里对成矿岩体进行补充。

红山矿区内岩浆活动频繁, 主要表现为一系列



图 3 紫金山铜金矿区采场隐爆角砾岩(A,B)
Fig.3 Crypto-explosive rock in the Zijinshan deposit(A,B)

浅成-超浅成侵入的酸性-中酸性侵入体及部分基性岩脉,早期为中细粒斑状黑云二长花岗岩、中粒斑状黑云二长花岗岩等(中)酸性岩株侵入;晚期为花岗斑岩、花岗闪长斑岩以岩脉、岩瘤形式定位,还伴随多期岩浆热液隐爆发生,大量出露于隐爆角砾岩筒内的自碎花岗斑岩角砾岩是主要成矿岩体;后期石英闪长(玢)岩和辉绿岩以脉岩形式出露,另外还见酸性的细粒花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩脉。

含铜成矿岩体花岗(闪长)斑岩分布在红山隐爆角砾岩筒中和外围,沿环状和放射状断裂分布。岩石呈现高硅、高钾和过铝的特点。岩石地球化学特征显示亏损 Sr、Ba、Nb、P、Ti、Y 等元素,富集 Rb、Th 等元素,Rb/Sr 及 Rb/Ba 比值高,具有壳幔混合的特征。

含铜成矿岩体花岗(闪长)斑岩锆石晶形发育良

好,长宽比约 2:1,有清晰的生长环带,呈现岩浆锆石的特征(图 4),再生边弱。经测定,岩石锆石核部的 Th/U 比值为 0.37~0.65;其 SHRIMP 年龄一致性很高(图 5,表 3),在(102.5±1.2)Ma,与早-晚白垩世间燕山晚期岩浆侵入和隐爆作用有关。

3.3 岩背斑岩型锡矿床成矿斑岩

会昌县岩背锡矿位于桃溪环形构造的西南缘,矿床产于中生代陆相火山断陷盆地边缘的火山机构中。矿体赋存于燕山晚期花岗斑岩侵位凹部的内外接触带。斑岩体呈岩瘤状,侵入于粗粒黑云母花岗岩中,为主要成矿岩体。矿田花岗岩在火山活动稍后呈多次侵入,成矿花岗岩属火山活动后第三次浅成侵入体。

岩背锡矿的围岩为密坑山岩体,它是一破火山

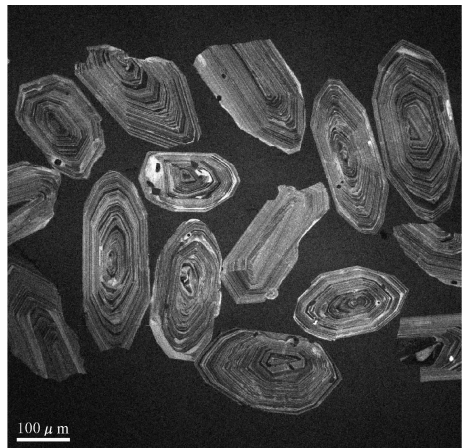
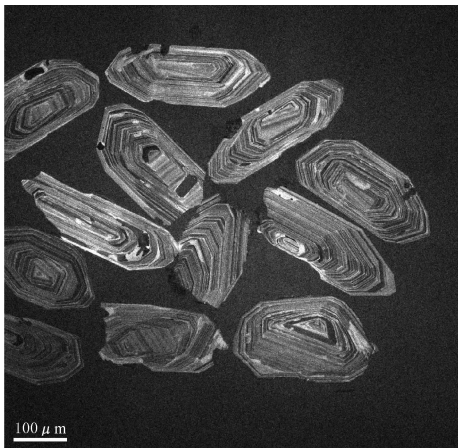


图 4 红山成矿花岗岩的锆石背散射照片
Fig.4 Backscattering photos of zircons from Hongshan ore-forming granite

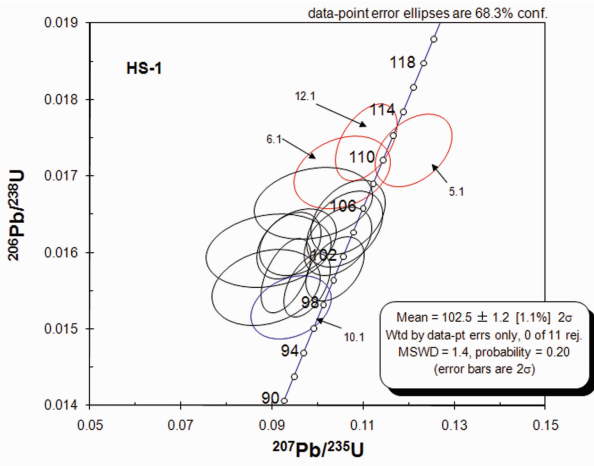


图 5 红山成矿花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 谐和图
Fig.5 SHRIMP U-Pb concordia diagram of zircons from Hongshan ore-forming granite

口中央的岩株侵入体。该岩体在地表表现为密坑山、岩背和苦竹寨三个岩体(图 6),在深部连成一片,它们是同一岩浆分别沿火山口的环状或放射状断裂侵入而成。岩背、凤凰寨、淘锡坝、苦竹寨、矿背、上湾等一批大、中型锡多金属矿床或矿点分布在该岩体与流纹质凝灰熔岩的内外接触带,表明这一岩体对成矿具有重要的制约作用。邱检生等研究表明,密坑山岩体主体岩性为钾长花岗岩,Rb-Sr 全岩等时年龄为 $(124.5 \pm 0.6)\text{Ma}$ ^[36];补充侵入阶段花岗斑岩的 Rb-

Sr 全岩等时年龄为 $(114.1 \pm 0.6)\text{Ma}$ ^[37],表明它们均为早白垩世岩浆活动的产物。该岩体具有富硅、偏碱性、富钾、贫 MgO 和 TiO₂、碱铝比 $(\text{Na}+\text{K})/\text{Al}$ 小于 0.90,属碱不饱和系列;岩石的铝过饱和,Al' $(\text{Al}-\text{Na}-\text{K}-2\text{Ca})$ 值均大于 0,与富铝矿物(黄玉和云母)的富集有关。Rb/Sr 及 Rb/Ba 比值高、铕负异常显著、富 Ga、Ga/Al 比值大、富高场强元素(如 Nb、Zr)等特点,说明该岩体不是典型的 S 型花岗岩,而应属铝质 A 型花岗岩。

根据花岗斑岩的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)值(表 4)和微量元素图解(图 7-a~d),反映其为同源岩浆分异演化晚阶段的产物,它们衍生于地壳源区,铅同位素资料也证实,岩背矿区成矿斑岩来源于地壳物质。同时,密坑山岩体偏高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 及偏低的 TDM 值均指示其在成岩过程中有较多幔源组分的参与。岩背火山岩、城坑花岗岩、清溪花岗岩、岩背花岗岩,构成一个由早到晚的喷出一侵入岩时间序列,是同一构造-岩浆活动时期的地质产物,反映了晚侏罗世—早白垩世是主要成矿期。

4 讨论

目前,有关中生代的中国东南部大地构造演化和岩浆演化存在其他观点,如:陆间碰撞与洋壳消减两种动力学体系控制下的岩浆作用,既不是岛弧环

表 3 红山成矿花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测定参数
Table 3 SHRIMP U-Pb data of Hongshan ore-forming granite

Spot	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb* ±%	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U ±%	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U ±%	err corr			
HS-1-1.1	868	324	0.39	104.3 ±2.1	110.2 ±4.3	0.0471	4.8	0.01059	5.2	0.01630	2.0	.387
HS-1-2.1	934	455	0.50	102.9 ±1.8	104.7 ±4.1	0.0422	4.6	0.0937	5.0	0.01609	1.8	.359
HS-1-3.1	1151	466	0.42	105.3 ±2.0	107.1 ±5.0	0.0470	4.6	0.1067	5.0	0.01646	2.0	.390
HS-1-4.1	1117	724	0.67	103.2 ±1.8	101.4 ±3.8	0.0430	5.5	0.0956	5.8	0.01613	1.8	.304
HS-1-5.1	786	316	0.42	110.8 ±2.0	114.5 ±4.8	0.0506	4.2	0.1211	4.6	0.01733	1.8	.393
HS-1-6.1	921	421	0.47	109.0 ±2.0	109.9 ±5.9	0.0448	6.3	0.1054	6.6	0.01705	1.8	.278
HS-1-7.1	1390	813	0.60	99.6 ±1.7	98.8 ±2.8	0.0455	2.9	0.0977	3.4	0.01557	1.8	.513
HS-1-8.1	992	429	0.45	100.4 ±2.0	92.7 ±3.5	0.0429	3.3	0.0930	3.9	0.01570	2.0	.526
HS-1-9.1	694	237	0.35	103.3 ±1.9	101.1 ±5.4	0.0469	4.3	0.1045	4.7	0.01615	1.8	.392
HS-1-10.1	1018	630	0.64	97.8 ±1.7	95.3 ±4.3	0.0447	5.9	0.0942	6.1	0.01528	1.8	.290
HS-1-11.1	650	258	0.41	106.4 ±2.0	102.0 ±8.0	0.0432	8.4	0.0991	8.6	0.01664	1.9	.218
HS-1-12.1	626	365	0.60	111.4 ±2.1	113.7 ±3.8	0.0460	3.6	0.1107	4.1	0.01744	1.9	.469
HS-1-13.1	1011	526	0.54	99.4 ±2.1	92.0 ±5.9	0.0414	8.6	0.0886	8.8	0.01555	2.1	.240
HS-1-14.1	853	392	0.48	102.5 ±2.0	96.0 ±7.7	0.0404	10.0	0.0893	10	0.01603	2.0	.196
HS-1-15.1	1045	557	0.55	101.0 ±1.8	100.4 ±3.4	0.0477	3.7	0.1039	4.1	0.01578	1.8	.432

注: * 表示普通 Pb 采用 ²⁰⁴Pb 校正。

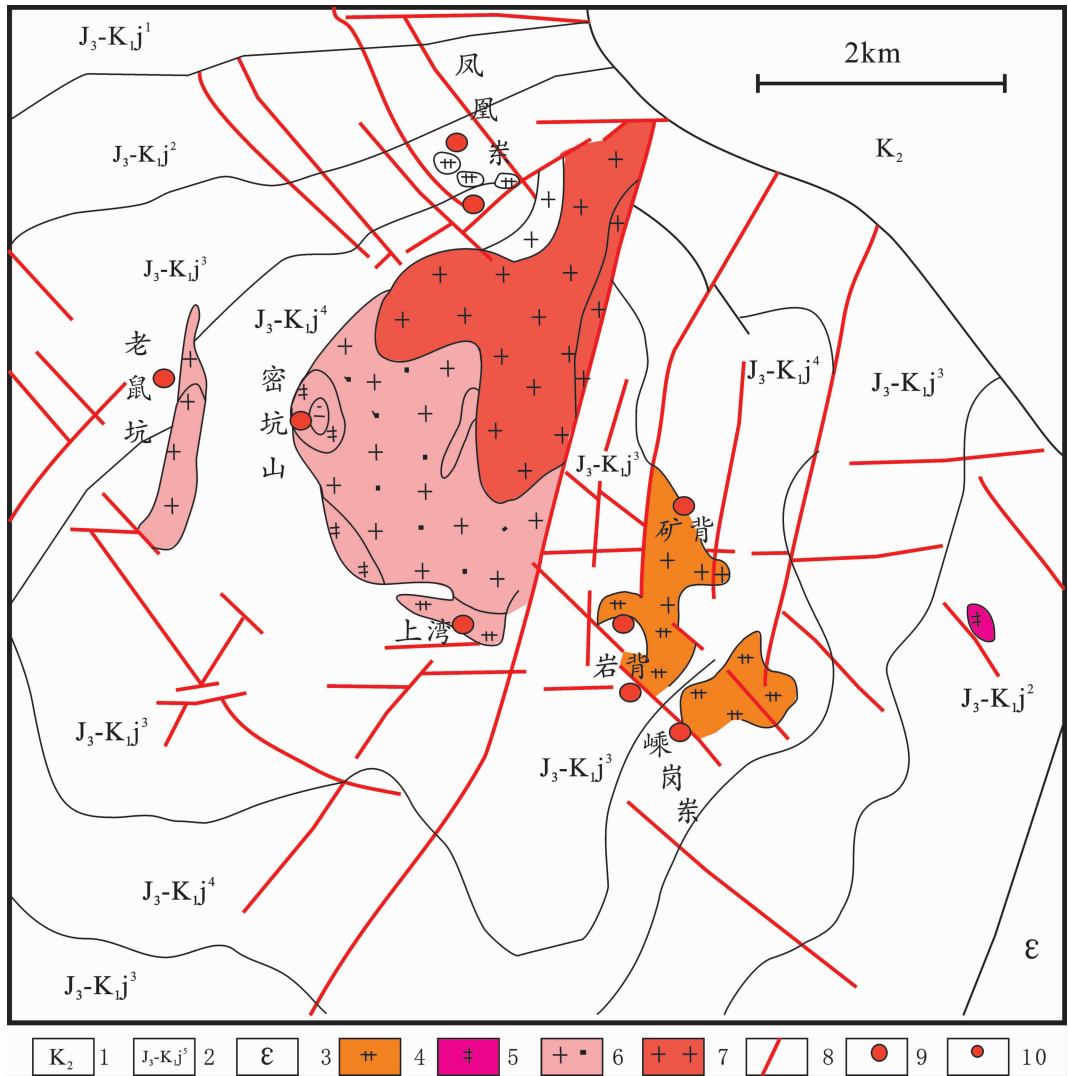


图6 岩背锡矿田地质图(据江西省赣南地质大队资料修编, 2010)

1—上白垩统; 2—上侏罗统—下白垩统鸡笼嶂组; 3—寒武系; 4—花岗岩斑岩; 5—细粒花岗岩; 6—粗斑细粒花岗岩; 7—粗粒花岗岩; 8—断层; 9—中大型锡矿床; 10—小型锡矿

Fig.6 Geological sketch map of the Yanbei ore district (modified after Gangnan Geological Party, 2010)

1—Upper Cretaceous; 2—Upper Jurassic—Lower Cretaceous Jilongzhang Formation; 3—Cambrian; 4—Granite porphyry; 5—Fine-grained granite; 6—Magnophyric fine-grained granite; 7—Coarse-grained granite; 8—Brittle fault; 9—Middle-large sized tin deposit; 10— Small tin deposit

境,也不属于板内裂谷,而属于过渡性质^[38];岩浆活动的环境可能为靠近板内的大陆边缘,非活动大陆边缘弧^[39];张旗等认为中国东南部的岩石圈减薄为拆沉作用所致,与大洋板块俯冲作用无关,为大陆内部构造演化事件^[40];汪洋等认为燕山期深部动力事件为玄武质岩浆底侵+地壳弱化+地壳加厚+后造山崩塌^[41]。

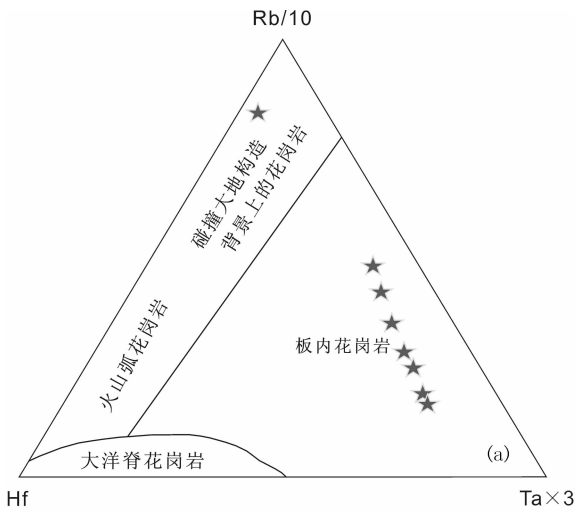
燕山晚期,中国东南部由板内环境转变为活动大陆边缘环境,岩石圈伸展走滑,形成了早白垩世高

钾钙碱性英安质—流纹质火山—侵入岩带;至晚白垩世区域广泛分布低钛双峰式玄武岩—英安岩—流纹岩及其浅成岩带,并形成A型晶洞花岗岩和基性岩脉群等^[42]。毛建仁等认为东南沿海区分布的燕山晚期侵入岩同位素年龄主要为两个阶段,即140~125 Ma和125~85 Ma,前者以准铝质花岗岩类为主,后者出现辉长岩和A型花岗岩及准铝质花岗闪长岩类等^[42]。

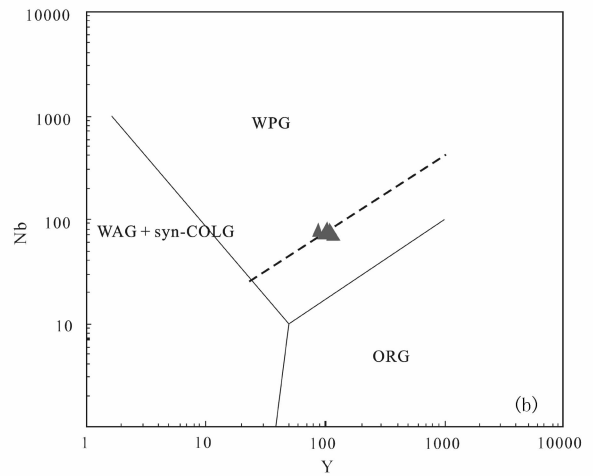
桃溪环形构造区紫金山、岩背和红山等典型成

表 4 岩背花岗岩同位素比值
Table 4 Ratio of isotopes of Yanbei ore-forming porphyries

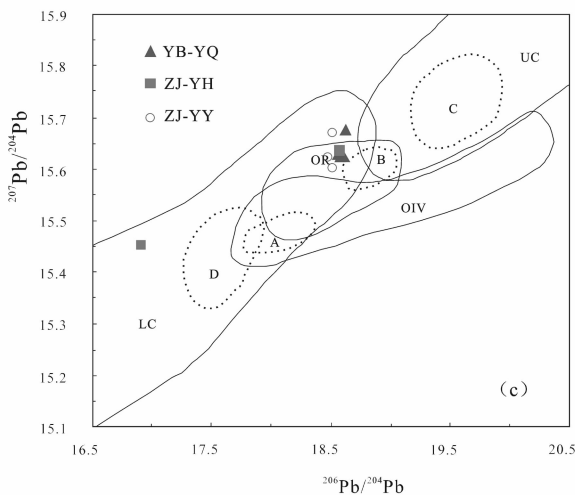
样品号	Sr 同位素			Nd 同位素			Pb 同位素		
	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{85}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{145}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
YB-YH-04	0.72460	0.05652	0.00056	1.14183	0.51246	0.34828	41.18410	0.75300	1.57713
YB-YH-07	0.72449	0.05650	0.00157	1.16810	0.51246	0.34832	41.26061	0.75672	1.98832
YB-YQ-01				1.52438	0.51217	0.34822	38.84440	0.84090	2.09038
YB-YQ-02	0.78227	0.05655	0.00065				38.85010	0.84107	2.09135
YB-YQ-06	0.79844	0.05647	0.00011				39.01170	0.84202	2.09542
YB-YQ-07	0.79577	0.05650	0.00062	1.14230	0.51222	0.34835	38.82203	0.84234	2.09246
YB-YQ-08				1.44440	0.51219	0.34836	38.83756	0.83990	2.08720



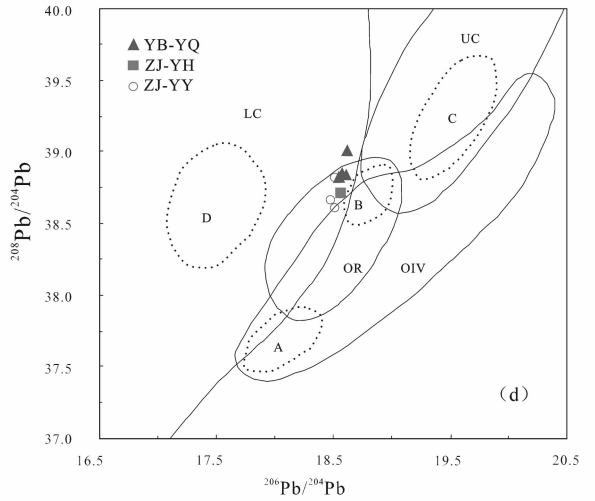
(a) 岩背花岗岩构造环境 Rb/Hf-Ta×3 判别图解



(b) 岩背花岗岩构造环境 Nb-Y 判别图解



(c) 岩背和紫金山含矿花岗岩铅 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素示踪图解 (Yb-岩背样品, ZJ-紫金山样品)



(d) 岩背和紫金山含矿花岗岩铅 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素示踪图解 (Yb-岩背样品, ZJ-紫金山样品)

图 7 典型矿床岩浆岩地球化学特征图解

Fig.7 Geochemical diagram of ore-forming granite in main deposits of Taoxi circular structure

矿岩体与其边部白垩纪火山盆地鸡笼嶂组、莲花寨群、版石群和赣州群火山岩一致,为同一岩浆演化的产物。如会昌中村橄榄玄粗系列的岩石,其 Rb-Sr 等时线年龄值为 108 Ma。橄榄玄粗岩系列的形成代表着在早白垩世末期拉张体系的形成和壳幔物质的交换。徐夕生等通过 Sm-Nd 同位素定年显示,中国东南大陆边缘底侵作用物质在地壳底部的结晶年龄为 $(112.3 \pm 17.8) \text{Ma}$,属晚中生代时期^[43]。这些底侵作用促成了地壳物质的部分熔融,部分辉长质岩浆则穿透了下地壳,直接参与了壳源岩浆的形成和演化,壳-幔两种岩浆相互作用形成了现今出露的 100~120 Ma 的玄武岩-流纹岩复合岩流,以及辉长岩-花岗岩杂岩体。基性岩浆的底侵作用促使下地壳发生角闪岩脱水部分熔融,在岩基根部形成高密度的石榴辉石岩,岩基根部最终发生重力失稳,形成滴水构造;在地貌上反映为滴水构造对应区域的沉降和相应的张性构造,在岩浆作用上则表现为软流圈地幔上涌和残余富集岩石圈地幔的低程度部分熔融,形成钾质火山岩^[44]。

桃溪环形构造区与中国东南部一样,出露白垩纪断陷盆地、A 型花岗岩、碱性岩、基性岩脉及双峰式火山岩^[45,1],表明白垩纪中国东南部处于伸展拉张的构造环境,最早的同位素年龄 (140 Ma)^[46],可能标

志着中国东南部全面进入岩石圈伸展拉张的构造时期(图 8)。

许志琴等在研究川西丹巴和雅江地区的地质构造中,也提出了热隆伸展构造的论点,强调逆冲收缩事件后大量印支期及燕山期地壳重熔及 S 型花岗岩侵位,使地壳变热,出现以上升的深熔花岗岩体为中心或古老变质杂岩重熔而上隆所造成的热隆构造^[47]。

桃溪隆起部位是深成岩浆活动区和深部热柱的活动部位,伴随有基性及碱性岩浆活动。伴随的岩浆岩以非造山期岩浆岩为特点,出现 A 型花岗岩及碱性、亚碱性花岗岩。桃溪环形构造区铜多金属矿以 90~130 Ma 为主要成矿期,100 Ma 的岩浆岩以双峰式为特点,是岩石圈拆沉和地壳深层次拆离作用的结果。

桃溪环形构造区成矿作用与武夷山成矿带一致,主要以斑岩-隐爆角砾岩型铜多金属成矿作用为主。成矿时代主要为中生代晚期,与被称为中生代岩浆-成矿大爆发的中国东南沿海一致。由地壳重熔形成的花岗质岩浆经过多期次和多阶段分异演化,抑或在最晚阶段富集成矿,抑或在主要阶段均伴随有矿化,还可能岩体仅作为能源加热,形成热液对流循环系统,从下部及周围岩石萃取矿质,最后于上部有利空间卸载成矿。

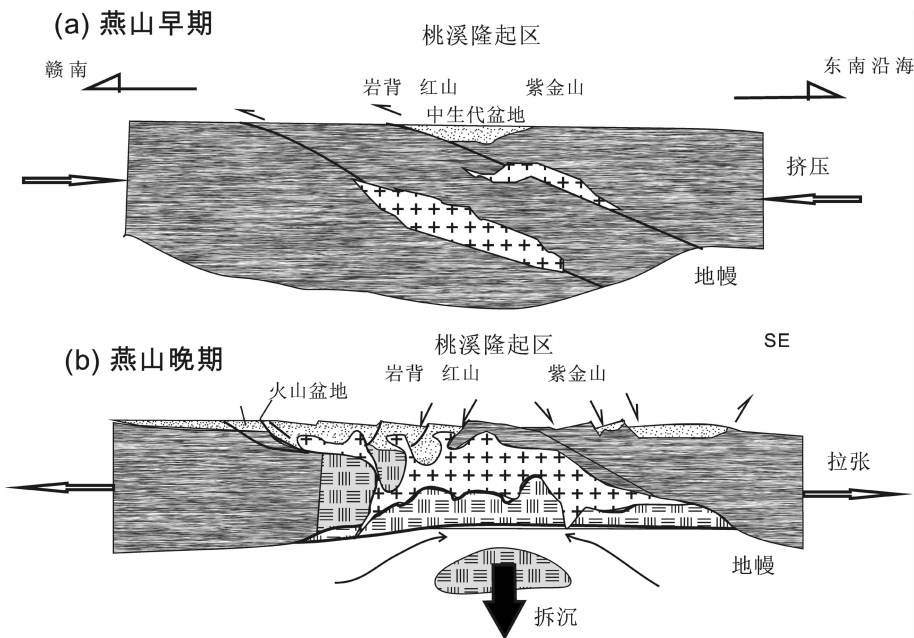


图 8 桃溪环形构造区构造、岩浆和成矿综合模式图

Fig.8 Tectonic, magmatic and metallogenic integrated model of Taoxi circular structure

5 结论

(1)武夷山成矿带南段发育桃溪环形构造区,环形区核部发育元古界中深变质岩基底和南华系至古生界的盖层,环形构造边部主要由晚中生代火山岩组成。火山岩周边分布大量的铜、金、锡、钨、铅锌、铀等多金属矿床,出现了特大型紫金山铜金矿、岩背锡矿,大型的悦洋银矿和红山铜矿等。

(2)紫金山铜金矿、岩背锡矿、红山铜矿等矿床研究表明,这些矿床的成矿时代和成矿斑岩的成岩时代都在中生代晚期,与燕山晚期构造岩浆作用密切相关,主要成矿年龄集中于125~90 Ma。空间上,蚀变矿化紧紧围绕次火山岩体分布。表明了成岩与成矿是岩浆演化产物,即它们具有物源的一致性,Cu、Au主要由中酸性岩浆带入。矿床地质、地球化学和同位素等特征都表现为斑岩型、隐爆角砾岩型或岩浆热液型多金属矿。

(3)这些矿床的成矿斑岩体同位素年龄在94~133 Ma,表现为与I型或铝质A型花岗岩密切相关,属壳幔混源花岗岩。

(4)桃溪环形构造区与壳幔混源岩浆岩存在成因联系,与晚中生代以来这一地区软流圈上涌、岩石圈减薄和地壳伸展作用密切相关。地壳伸展和岩浆顶托造成了桃溪基底岩石的快速隆升,相容含矿元素铜金等地幔物质参与了中下地壳的重熔。地幔物质的参与程度、地壳熔融区的成矿元素含量、岩浆结晶分异程度和流体存在的地球化学环境(流体组合和流体逸度),以及定位深度等指标是决定成矿类型和矿种的关键因素。

(5)这种大陆动力学的成因认识的意义在于桃溪环形构造区与成矿关系密切不是由于提供元古界矿源层,而是燕山晚期桃溪环形构造区在岩石圈动力学过程中形成演化,并演绎了岩浆作用及其相关的成矿作用。

致谢:两位匿名专家精心评审提出了建设性的意见和建议,并对原文不当之处直接进行了修改,使作者受益匪浅。在对桃溪区研究中有幸得到了周济元、李耀西、兰善先、陈鹤年和邱家骧等人的指导和帮助,陈鹤年研究员还修改了文稿,特致谢意。该研究得到了中国地调局资源评价项目的资助。

参考文献(References):

[1] 陈世忠, 马明, 陈刚, 等. 武夷山成矿带桃溪隆起、岩浆侵入和区

域铜多金属矿成矿作用[J]. 地球科学, 2010, 35(6):969-984.

Chen Shizhong, Ma Min, Chen Gang, et al. Taoxi uplift, Its tectonics, magmatism and metallogeny, Wuyi metallogenic belt[J]. Earth Science, 2010, 35 (6):969-984 (in Chinese with English Abstract).

[2] 陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 等. 中国东部燕山期火山岩浆大爆发[J]. 矿床地质, 1999, 18(4):316-322.

Tao Kuiyuan, Mao Jianren, Xing Guangfu, et al. Strong Yanshanian volcanic magmatic explosion in east China [J]. Mineral Deposits, 1999, 18(4):316-322(in Chinese with English abstract).

[3] 华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发 [J]. 矿床地质, 1999, 18(4):300-307.

Hua Renmin, Mao Jingwen. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in east China[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(4):300-307(in Chinese with English abstract).

[4] 陈景和, 1999. 紫金山铜金矿床成矿模式[J]. 黄金, 20(7):6-11.

Chen Jinghe. The metallogenic mode of Zijinshan copper (gold) deposit [J]. Gold, 1999, 20 (7):6-11 (in Chinese with English abstract).

[5] 张德全, 李大兴, 丰成友, 等. 紫金山地区中生代岩浆系统的时空结构及其地质意义[J]. 地球学报, 2001, 22(5):403-408.

Zhang Dequan, Li Daxing, Feng Chengyou, et al. The temporal and spacial framework of the Mesozoic magmatic system in the Zijinshan region and its geological significance[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22 (5): 403-408(in Chinese with English abstract).

[6] 张德全, 丰成友, 李大新, 等. 紫金山地区斑岩-浅成热液成矿系统的成矿流体演化[J]. 地球学报, 2005, 26(2):127-136.

Zhang Dequan, Feng Chengyou, Li Daxin, et al. The evolution of ore-forming fluids in the porphyry-epithermal metallogenic system of Zijinshan area[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26(2): 127-136 (in Chinese with English abstract).

[7] 朱正书. 江西会昌岩背锡矿床地质特征及矿床类型的划分 [J]. 矿床地质, 1990, 9(4):325-330.

Zhu Zhengshu. Geological features and mineralization types of the Yanbei tin deposit in Huichang County, Jiangxi Province [J]. Mineral Deposits, 1990, 9 (4):325-330 (in Chinese with English abstract).

[8] 梅勇文, 叶景平, 朱元早, 等. 赣南地区锡多金属隐伏矿床预测研究[M]. 北京:地质出版社, 1994:1-120.

Mei Yongwen, Ye Jingpin, Zhu Yuanzao, et al. Prediction of Tin-polymetallic Hidden Deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:1-120 (in Chinese) .

[9] 熊小林, 朱金初, 刘昌实, 等. 江西岩背斑岩锡矿蚀变分带及其主要蚀变岩的地球化学特征[J]. 矿床地质, 1994, 13(1):1-10.

Xiong Xiaolin, Zhu Jinchu, Liu Changshi, et al. Alteration zoning of the Yanbei porphyry tin deposit in Jiangxi Province and geochemical characteristics of its main altered rocks [J]. Mineral Deposits, 1994, 13(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).

[10] 王德滋, 沈渭洲, 刘昌实, 等. 江西岩背火山侵入杂岩的地球化学特征和成因[J]. 中国科学(B辑), 1994, 24(5):531-538.

- Wang Dezi, Shen Weizhou, Liu Changshi, et al. Geochemical characteristics and origin of the Yanbei volcano-intrusive complex in Jiangxi Province [J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 24(5): 531-538 (in Chinese with English abstract).
- [11] 沈渭洲, 王德滋, 刘昌实, 等. 岩背斑岩锡矿特征和成因[J]. *高校地质学报*, 1996, 2(1): 85-91.
- Shen Weizhou, Wang Dezi, Liu Changshi, et al. Characteristics and origin of the Yanbei porphyry tin deposit[J]. *Geological Journal of Universities*, 1996, 2 (1):85-91 (in Chinese with English abstract).
- [12] Liu Changshi, Ling Hongfei, Xiong Xiaolin, et al. An F-rich, Sn-bearing volcanic-intrusive complex in Yanbei, South China [J]. *Economic Geology*, 1999, 94(3):325-341.
- [13] 周济元, 崔炳芳, 方文碧, 等. 江西会昌周田盆地东侧双峰式火山岩及其构造环境[J]. *火山地质与矿产*, 1998, 9(1):12-23.
- Zhou Jiyuan, Cui Bingfang, Fang Wenbi, et al. The bimodal volcanic rock and its tectonic setting in the Eastern Zhoutian basin in Huichang, Jiangxi Province [J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 1998, 9(1):12-23(in Chinese with English abstract).
- [14] 陈世忠, 周济元, 崔炳芳. 江西红山隐爆角砾岩-斑岩型铜矿床气液包体特征及成矿物理化学条件 [J]. *火山地质与矿产*, 1998, 19(3): 205-213.
- Chen Shizhong, Zhou Jiyuan, Cui Bingfang. Characteristic fluid inclusions and geophysical-chemical ore-forming conditions of Hongshan cryoexplosive breccia-porphyry copper deposit in Huichang, Jiangxi [J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 1998, 19:205-213(in Chinese with English abstract).
- [15] 陈世忠, 周济元, 崔炳芳. 江西红山隐爆角砾岩-斑岩型铜矿床的成因[J]. *火山地质与矿产*, 1998, 19(4): 338-346.
- Chen Shizhong, Zhou Jiyuan, Cui Bingfang. Study of the origin of Hongshan brecciated copper deposit in Huichang County, Jiangxi [J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 1998, 19 (4): 338-346(in Chinese with English abstract).
- [16] Chen Shizhong, Zhou Jiyuan, Cui Bingfang. Study on the origin of the Hongshan brecciated copper deposit in Huichang County, Jiangxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2007, 21(2):130-137.
- [17] 马金清. 福建若干基础地质问题及研究方向探讨 [J]. *福建地质*, 2002, 4:200-205.
- Ma Jinqing. Discussion on some fundamental geology problems and their studying orientation, Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 2002, 4:200-205(in Chinese with English abstract).
- [18] 于津海, 王丽娟, 周新民, 等. 粤东北基底变质岩的组成和形成时代[J]. *地球科学*, 2006, 31(1): 38-48.
- Yu Jinhai, Wang Lijuan, Zhou Xinmin, et al. Compositions and formation history of the basement metamorphic rocks in northeastern Guangdong Province [J]. *Earth Science*, 2006, 31(1): 38-48(in Chinese with English abstract).
- [19] 福建省地质矿产局. 福建省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1985:1-850.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Fujian Province. *Geological Map of Fujian Province* [M], Beijing: Geological Publishing House, 1985:1-850 (in Chinese).
- [20] 张顺金, 黄昌旗, 陈泽霖, 等. 华南武夷山区桃溪旋卷变质核杂岩构造的基本特征及形成机制探讨 [J]. *福建地质*, 2000, 19(4): 188-196.
- Zhang Shunjin, Huang Changqi, Chen Zelin, et al. Discussion on main features and formation mechanism of the convolitional structures of Taoxi metamorphic core complex in Wuyi Mountains, South China[J]. *Geology of Fujian*, 2001, 19(4):188-196(in Chinese with English abstract).
- [21] 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1988:1-750.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangdong Province. *Geological Map of Guangdong Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:1-750 (in Chinese).
- [22] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1989:1-617.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. *Geological Map of Zhejiang Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989:1-617 (in Chinese).
- [23] 江西省地质矿产局. 江西省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1984:1-921.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province. *Geological Map of Jiangxi Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984:1-921 (in Chinese).
- [24] 聂永红, 李曙光, 葛宁洁, 等. 浙西南北园八都群石榴斜长角闪岩的变质特征及年代[J]. *矿物学报*, 1995, 15(4):442-450.
- Nie Yonghong, Li Shuguang, Ge Ningjie, et al. Metamorphic features and ages of garnet amphibolites in Beiyuan, southwestern Zhejiang Province, China [J]. *Acta Mineral. Sinica*, 1995, 15 (4): 442-450(in Chinese with English abstract).
- [25] 赵风清, 金山文, 甘晓春, 等. 华夏地块前加里东期变质基底的特征以及深部地壳性质[J]. *地球学报*, 1995, 3: 235-245.
- Zhao Fengqing, Jin Wenshan, Gan Xiaochun, et al. Discussions on the characteristics of the deep crust and Pre-Caledonian metamorphic basement in the Cathaysia block, southeastern China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1995, 3:235-245 (in Chinese with English abstract).
- [26] Zhao Guochun, Cawood P A. Tectonothermal evolution of the Mayuan assemblage in the Cathaysia block: implications for Neoproterozoic collision-related assembly of the South China Craton[J]. *Am. J. Sci.*, 1999, 299: 309-339.
- [27] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化:从华夏地块到加里东期造山带[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4): 418-431.
- Shu Liangshu. Predevonian tectonic evolution of South China: From Cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt [J]. *Geol. J. China Univ.*, 2006, 12 (4), 418-431 (in Chinese with English abstract).
- [28] Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, et al. SHRIMP U - Pb zircon

- geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia Block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units [J]. *Gondwana Research*, 2007, 12 (1-2): 166-183.
- [29] Yu Jinhai, O'Reilly S Y, Wang Lijuan, et al. Finding of ancient materials in Cathaysia and implication for the formation of Precambrian crust[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2007, 52:13-22.
- [30] Yu Jinhai, Xu Xisheng, Zhou Xinmin. Late Mesozoic crust-mantle interaction and lower crust components in South China: A geochemical study of mafic granulite Xenoliths from Cenozoic Basalts[J]. *Science in China*, 2003, 46(5):447-460.
- [31] 刘林清. 从遥感图像看桃溪环形构造及其对铀矿分布的控制[J]. *江西地质*, 1995, 10(1):69-74.
Liu Linqing. Taoxi annular structure and its controlling on the distribution of uranium deposit from the view of remote sensing image[J]. *Geology of Jiangxi*, 1995, 10(1):69-74(in Chinese with English abstract).
- [32] 高天钧, 黄仁生. 福建上杭紫金山矿田铜银金矿床类型及对比[J]. *火山地质与矿产*, 1998, 19(4):283-294.
Gao Tianjun, Huang Rensheng. Comparison of typical characters of Zijinshan copper gold silver deposit, Shanghang, Fujian Province [J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 1998, 19 (4):283-294(in Chinese with English abstract).
- [33] 华仁民, 陆建军, 陈培荣, 等. 中国东部晚中生代斑岩-浅成热液金(铜)体系及其成矿流体[J]. *自然科学进展*, 2002, 12(3): 240-244.
Hua Renmin, Lu Jianjun, Chen Peirong, et al. The Late Mesozoic porphyry-epithermal Au-Cu system in East China and their ore-forming fluids [J]. *Progress in Natural Sciences*, 2002, 12 (3):240-244(in Chinese).
- [34] 张德全, 余宏全, 李大新, 等. 紫金山地区的斑岩-浅成热液成矿系统[J]. *地质学报*, 2003, 77(2):160-168.
Zhang Dequan, She Hongquan, Li Daxin, et al. The porphyry-epithermal metallogenic system in the Zijinshan region [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77 (2):160-168 (in Chinese with English abstract).
- [35] 毛建仁, 陶奎元, 李寄岬, 等. 闽西南晚中生代四方岩体同位素年代学、地球化学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2002, 18(4):449-458.
Mao Jianren, Tao Kuiyuan, Lee C Y, et al. Geochronology and geochemical characteristics in late Mesozoic Sifang pluton, southwestern Fujian, and their significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(4):449-458(in Chinese with English abstract).
- [36] 邱检生, BIA McInnes, 蒋少涌, 等. 江西会昌密坑山岩体的地球化学及其成因类型的新认识[J]. *地球化学*, 2005, 34(1):20-32.
Qiu Jiansheng, BIA McInnes, Jiang Shaoyong, et al. Geochemistry of the Mikengshan pluton in Huichang County, Jiangxi Province and new recognition about its genetic type [J]. *Geochimica*, 2005, 34(1): 20-32(in Chinese with English abstract).
- [37] 王德滋, 沈渭洲, 刘昌实, 等. 江西岩背火山侵入杂岩的地球化学特征和成因[J]. *中国科学(B辑)*, 1994, 24(5):531-538.
Wang Dezi, Shen Weizhou, Liu Changshi, et al. Geochemical characteristics and origin of the Yanbei volcano-intrusive complex in Jiangxi Province[J]. *Science in China(B)*, 1994, 24(5): 531-538 (in Chinese with English abstract).
- [38] 陶奎元, 毛建仁, 杨祝良, 等. 中国东南部中生代岩石构造组合和复合动力学过程的记录[J]. *地学前缘*, 1998, 5(4):183-190.
Tao Kuiyuan, Mao Jianren, Yang Zhuliang, et al. Mesozoic petro-tectonic associations and records of the geodynamic processes in southeast China[J]. *Earth Science Frontier*, 1998, 5(4):183-190(in Chinese with English abstract).
- [39] 谢家莹, 尹家衡, 陶奎元, 等. 中国东南大陆中生代火山地质及火山-侵入杂岩[M]. 北京: 地质出版社, 1996:1-277.
Xie Jiaying, Yu Jiaheng, Tao Kuiyuan. *Mesozoic Volcanic Geology and Volcano-intrusive complexes of Southeast China Continent* [M]. Beijing: Geological Publish House, 1996:1-277 (in Chinese with English abstract).
- [40] 张旗, 赵太平, 王焰, 等. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3):273-292.
Zhang Qi, Zhao Taiping, Wang Yan, et al. A Discussion on the Yanshanian Magmatism in Eastern China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20 (3): 273-292 (in Chinese with English abstract).
- [41] 汪洋, 姬广义, 邓晋福. 燕山地区侏罗纪-白垩纪岩浆活动特征及其与造山演化的关系 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(4): 344-349.
Wang Yang, Ji Guangyi, Deng Jinfu. Jurassic-Early Cretaceous magmatism in the Yanshan orogen: Characteristics and relations with orogenic evolution [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(4):344-349.
- [42] 毛建仁, 高桥浩, 厉子龙, 等. 中国东南部与日本中新生代构造-岩浆作用对比研究[J]. *地质通报*, 2009, 28(7):844-856.
Mao Jianren, Yutaka Takahashi, Li Zilong, et al. Correlation of Meso-Cenozoic tectono-magmatism between SE China and Japan [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28 (7):844-856(in Chinese with English abstract).
- [43] 徐夕生, 周新民, S Y O'Reilly, 等. 中国东南部下地壳物质与花岗岩成因探索[J]. *岩石学报*, 1999, 15(2):217-223.
Xu Xisheng, Zhou Xinmin, O'Reilly S Y, et al. Exploration for the lower crustal materials and granite genesis in southeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15 (2):217-223 (in Chinese with English abstract).
- [44] 曾令森, 刘静, Jason B Saleeby, 等. 大型花岗岩基形成和演化的深部动力学过程: 滴水构造、钾质火山作用与地表地质过程[J]. *地质通报*, 2006, 35(4):1257-1273.
Zeng Lingsen, Liu Jing, Saleeby J B, et al. Root zone processes for the formation and evolution of a large-scale granitic batholith: Drip structures, potassic volcanism and earth surface processes [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 35(4):1257-1273(in Chinese

with English abstract).

[45] 马金清, 何文兴, 冯宗帜. 福建省中生代双峰式火山岩的特征及成因[J]. 中国区域地质, 1998, 17(3):241-246.

Ma Jingqing, He Wenxing, Feng Zongzhi. Features and origin of Mesozoic bimodal volcanic rocks in Fujian Province [J]. Regional Geology of China, 1998, 17(3):241-246(in Chinese with English abstract).

[46] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 1997, 26(2):14-31.

Li Xianhua, Hu Ruizhong, Rao Bing. Geochronology and geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China [J]. Geochimica, 1997, 26 (2):14-31 (in Chinese with English abstract).

[47] 许志琴, 候立玮, 王宗秀. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京:地质出版社, 1992.

Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxiu, et al. China Songpan-Ganze Orogenic Belt Orogenic Process [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992 (in Chinese).

Magmatism and ore-forming background of the main deposits in Taoxi circular structure along the Wuyishan ore belt

CHEN Shi-zhong, HUANG Zheng-qing, ZHU Xiao-ting, CHEN Gang, MA Min

(Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Taoxi circular structure is one of the circular structures and also a part of Wuyishan uplift and appears as metamorphic core complexes. There are abundant medium-large sized copper and polymetallic ore deposits distributed within the circular structure, such as Zijinshan Cu-Au deposit, Yanbei Sn deposit and Hongshan Cu deposit. The Zijinshan Cu-Au deposit has the biggest gold ore reserves in China and the Yanbei deposit is a superlarge deposit with more than 300,000 t Sn. The area represents a rich segment of the Wuyi metallogenic belt. The main geochronologic dating of mineralization yielded ages in the range of 130-90Ma, suggesting the Late Yanshanian period. The ore deposits as well as most copper-gold ore deposits located in Taoxi circular structure are of porphyry-magmatic hydrothermal type. The Zijinshan Cu-Au deposit, the Yanbei Sn deposit and the Hongshan Cu deposit all show that the ore-forming porphyries are I-type granites and their ages are from 94 to 133Ma, close to the age of mineralization (125-90Ma). Both magmatism and mineralization occurred in the circular structure, which are called "Mesozoic magmatic and metallogenic explosion". Geochronologic dating of ore-bearing porphyry stocks yielded ages of 90-133Ma, implying the middle to late period derivatives of Yanshanian magmatic complex that resulted from the interaction of the crust with the mantle and the lithosphere delamination in the Late Mesozoic period. The swelling of Taoxi circular structure and the development of the rift together with the intrusion and eruption of the magma accelerated metallogenic process in the study area. Taoxi circular structure is characterized by lithosphere thickening and delamination, intrusion of the asthenosphere-derived mafic rocks, and accompanied mineralization.

Key words: Taoxi circular structure; Wuyishan ore belt; Zijinshan Cu-Au deposit; ore-forming porphyry

About the first author: CHEN Shi-zhong, male, born in 1967, senior researcher, mainly engages in survey of mineral resources, study of mineral deposits and prognosis of mineral resources; E-mail: chenshizhong@gmail.com.