

浙江平水铜矿含硫化物石英脉锆石 U-Pb 定年及其地质意义

李春海^{1,2} 邢光福² 姜耀辉¹

董永观² 俞锡明³ 陈志洪² 姜 杨² 陈 荣²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093; 2. 南京地质矿产研究所, 江苏 南京 210016;
3. 绍兴平铜集团有限公司, 浙江 绍兴 312050)

摘要:平水铜矿是位于扬子板块和华夏板块结合带(即钦杭结合带)北东段的典型火山岩型块状硫化物矿床,其铜矿主要形成于石英-黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿阶段。本文对其块状矿体下部发育的含硫化物石英脉中锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 精确测年,CL 图像和 Th/U 比值显示锆石多为岩浆成因,测年数据可分为 5 组: 981~988 Ma、(950±15)Ma、(926±13)Ma、(899±21)Ma 和 93~120 Ma。地质证据和定年结果表明平水铜矿的成矿年龄为新元古代早期(~899 Ma),白垩纪的热事件(93~120 Ma)对矿体进行了叠加改造作用。这一认识对深入了解平水铜矿的成因、形成和演化具有重要地质意义,同时提供了在钦杭结合带寻找火山岩型块状硫化物矿床的年代学信息。

关键词:新元古代;锆石 U-Pb 定年;火山岩型块状硫化物矿床;平水铜矿;浙江省;钦杭结合带

中图分类号:P618.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)02-0477-11

华南板块是 1100~1000 Ma 的“四堡造山”中由扬子板块和华夏板块拼贴而成的^[1],拼贴带为钦州湾-杭州湾(简称钦杭)结合带(图 1-a)^[2-4],北东段(浙江段)被称为江山-绍兴(简称江绍)结合带,前人对其地质矿产^[5,6]和大地构造演化,尤其是对 Rodinia 超大陆的形成和裂解,开展了大量的年代学、地球化学、古地磁学、地层学、古生物学和构造地质学等研究^[1,7-21]。海底火山喷发沉积作用形成的块状硫化物矿床是该结合带中的重要矿床类型之一,位于浙江绍兴东南 11 km 的平水(也称西裘)铜矿就是其中之一^[22-26]。

平水地区区域地层除第四系外,主要发育元古宇和白垩系,部分地区发育侏罗系。元古宇为平水群海相火山-沉积岩系,主体为细碧角斑岩系,局部夹泥质岩、硅质岩和砂岩,经历了区域动力变质作用,

主要是千枚岩化和片岩化,变质程度以低绿片岩相为主,局部达高绿片岩相或角闪岩相。出露的侵入岩主要为晋宁期和燕山期(图 1),前者多属幔源型,后者多属同熔型或改造型。区域上最重要的深大断裂为江山-绍兴断裂,大致呈北东向展布,倾向北西或南东,以北西居多,倾角多为 45°~88°^[23]。前人对平水地区元古宙细碧角斑岩和石英闪长岩的研究表明,它们是中元古代晚期或新元古代早期江南古岛弧外侧同一富钠的幔源岩浆、不同阶段分异结晶作用的产物^[27-29],平水铜矿形成于岛弧背景^[6, 23, 27-31]。

前人对平水铜矿矿床地质及成因进行过研究。在构造环境、共生岩系、矿化蚀变分带地质特征上,它是一个类似于“黑矿型”的块状硫化物矿床,硫主要来自海水,成矿金属来自深部岩浆和火山沉积岩系^[24]。矿石的元素地球化学和 S、Pb、Si、O 同位素地球化学

收稿日期:2009-08-07;改回日期:2009-11-11

基金项目:中国地质调查局“东部沿江沿海基础地质调查综合研究”项目(1212010610611)和国土资源部“华夏-扬子板块拼合带北东段的形成与破坏及其成矿作用”项目(200811015)资助。

作者简介:李春海,男,1979 年生,博士生,助理研究员,矿床学专业;E-mail:clark3223@yahoo.com.cn。

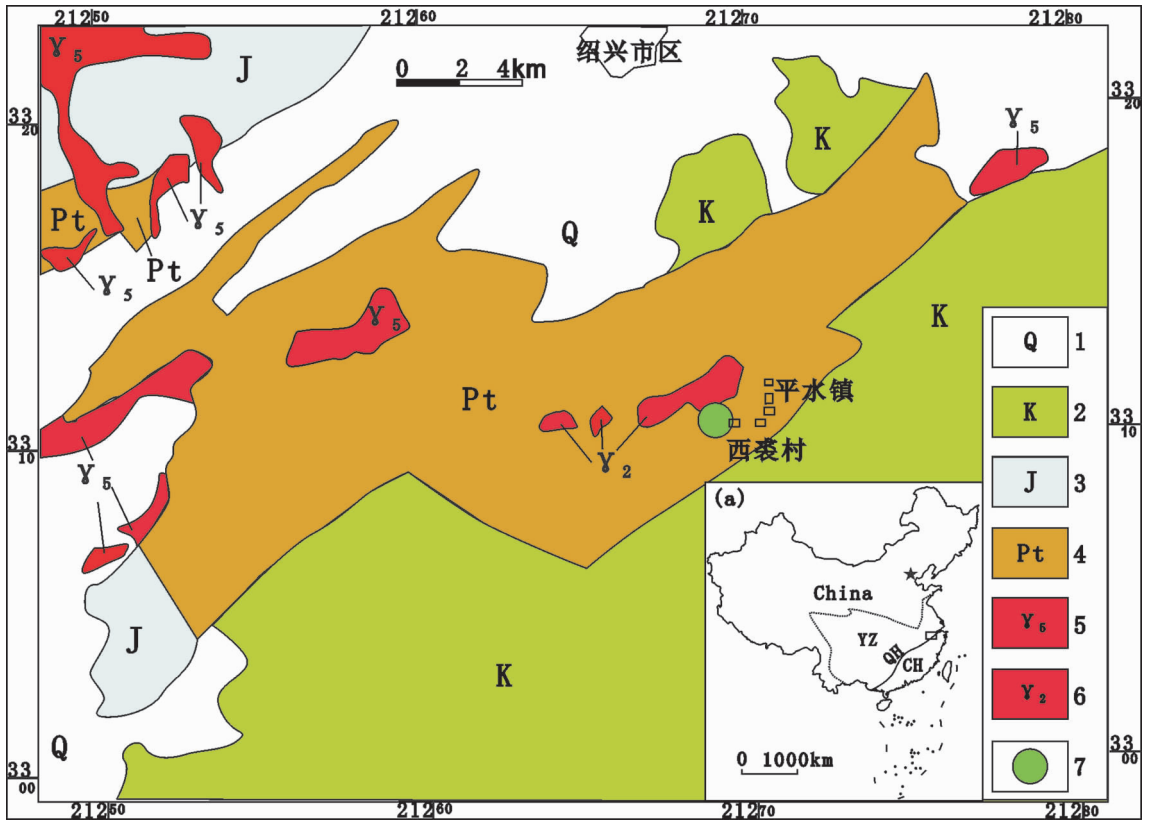


图1 平水地区区域地质略图(据①, ② [2-4]修改)

1—第四系;2—白垩系;3—侏罗系;4—元古界;5—燕山期花岗岩类;6—晋宁期花岗岩类;7—矿区;
YZ—扬子板块;CH—华夏板块;QH—钦杭结合带

Fig.1 Regional geological sketch map of Pingshui area (modified from ①, ②, [2-4])

1- Quaternary; 2- Cretaceous; 3- Jurassic; 4- Proterozoic; 5- Yanshanian granitoids; 6- Proterozoic granitoids;
7- Ore deposit; (a): YZ- Yangtze block; CH- Cathaysian block; QH- Qinzhou-Hangzhou collision belt

亦显示火山热水沉积成矿特征^[25,32]。前人获得了大于668 Ma 的黄铁矿、黄铜矿普通铅单阶段模式年龄,指出其成矿时代接近元古宙双溪坞群(今平水群已从该群中分离出来)中的火山岩时代^[24],为中元古代^[23]。但迄今为止,还没给出平水铜矿的精确成矿年龄,而成矿年龄对确定成矿物质来源、矿床成因和区域构造演化等研究具有重要的意义^[33]。为此,笔者对平水铜矿-335 m 中段2线块状矿体下部的浸染状矿化石英脉进行了单颗粒锆石 LA-ICP MS U-Pb 定年。

1 矿床地质特征

平水矿区出露的地层为第四系和元古界平水群

(图2),地层褶皱构造不是非常明显,主要是由平水群构成的倾向北西、倾角中等的单斜构造,断裂构造多呈北东走向^④。出露的侵入岩有晋宁期花岗岩、花岗斑岩和闪长岩,岩脉有辉绿岩、霏细岩和石英斑岩等^④。

矿床由若干个叠瓦状展布的透镜状、块状及与其紧邻的浸染状矿体组成,其中I号主矿体(铜矿体)主要赋存于第一火山旋回顶部火山沉积岩系中^[24],厚1~47.95 m,平均厚8.81 m,倾向北西(约320°),倾角50°~70°,长约1100 m,深大于800 m,呈舒缓波状弯曲^[25,34]。I号主矿体-335 m 中段2线矿化带分为矿体顶板(角斑质岩)、块状矿体、浸染状矿体、矿体底板(硅质岩)(图3)。上覆角斑岩与块状矿体之间、块状

①浙江省区域地质测量大队,中华人民共和国1:20万诸暨幅矿产图,1977。

②邢光福,等编.1:100万华东地区地质图,南京地质矿产研究所,2009。

③冶金工业部第一地质勘查局(二队).浙江省绍兴县平水铜矿区10-5线-385米~600米标高地质详查报告,2004:1-99。

④李春海.平水铜矿地质特征、成矿时代和成矿模式.南京大学2008年硕士学位论文,2008:1-57。

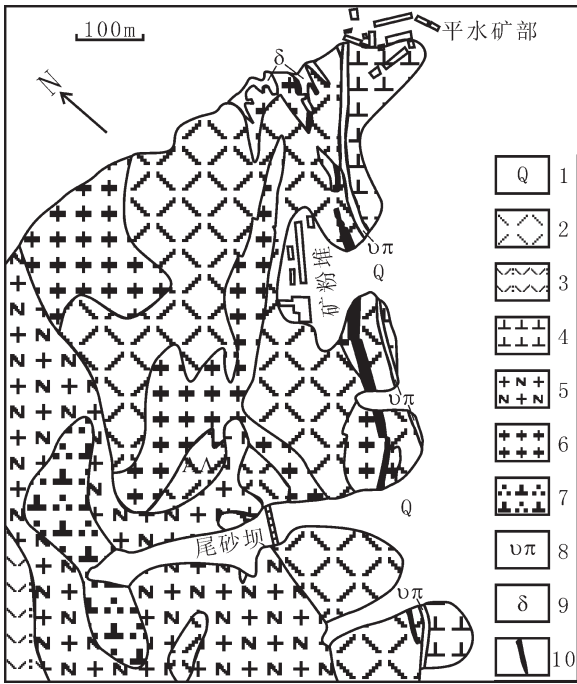


图 2 平水铜矿矿区地质图(据①修改)

- 1—第四系;2—新元古代细碧角斑岩系;3—新元古代片理化碎屑岩;4—新元古代片理化闪长岩;5—新元古代斜长花岗岩;
- 6—新元古代花岗岩;7—新元古代石英闪长岩;8—霏细岩脉;
- 9—闪长岩脉;10—矿体

Fig.2 Geological map of the Pingshui copper ore district (modified from ①)

- 1-Quaternary; 2- Upper Proterozoic spilite-keratophyre series;
- 3- Upper Proterozoic schistositized clastic rocks; 4- Neoproterozoic schistositized diorite; 5- Neoproterozoic plagiogranite;
- 6- Neoproterozoic granite-porphphyry; 7- Neoproterozoic quartz diorite; 8-Felsite vein; 9-Diorite vein; 10-Ore body

矿体与浸染状矿体之间为断层接触,浸染状矿体与下盘围岩呈过渡关系。上盘围岩蚀变多为绿泥石化、硅化;下盘围岩蚀变主要有硅化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化、黄铁矿化、重晶石化、方解石化和高岭土化等^②。刘继顺^[65]指出喷流沉积矿床中存在同生长断层时,矿体上盘、下盘围岩蚀变都比较发育,可能意味着此处断层为同生长断层。

矿石构造主要为块状、浸染状、条带状、纹层状和同生角砾状,矿石结构主要为细粒他形-半自形结构、碎裂结构、胶结结构和乳浊状结构;矿石矿物主要为黄铁矿、黄铜矿,少量闪锌矿和重晶石,脉石矿物主要有石英、方解石和绿泥石等;成矿期分为 4 个矿化阶段,分别是微细粒石英-微细粒黄铁矿-绿泥石矿化阶段、细粒石英-黄铁矿矿化阶段、石英-黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿矿化阶段、石英-黄铁矿-方解石-重晶石矿化阶段,黄铜矿主要形成于第 3 矿化阶段^③。

2 样品描述及测试方法

在含石英脉中挑选锆石测定成矿年龄已成为一种常用方法^[36,37]。本次用于定年的锆石就采自上述浸染状矿体中的矿化石英脉(图 3)。矿化石英脉,呈透镜状或条带状,并见轻微褶皱形态,弱千枚理化,为与浸染状矿体同期或准同期形成之产物,主要由石英组成,其次为硫化物(5%~20%),少量方解石和

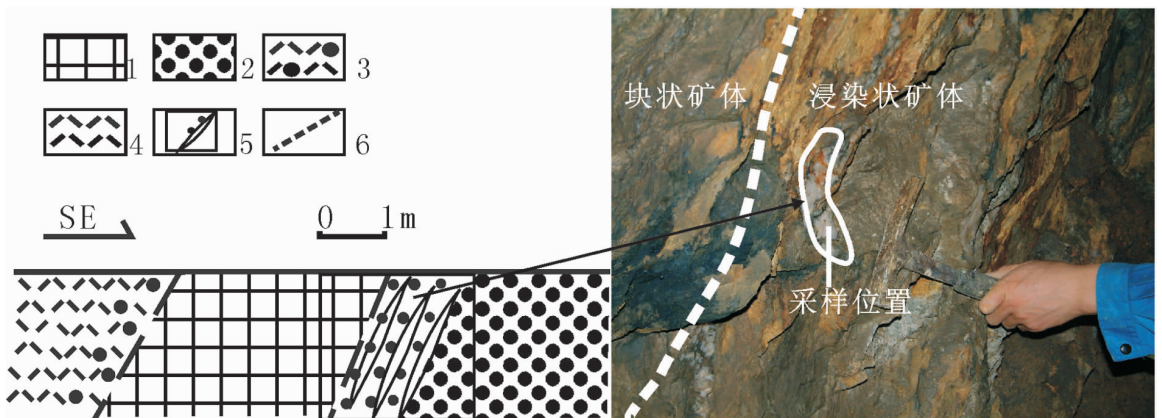


图 3 矿体和围岩关系及测年样品采样位置

- 1—块状矿体;2—浸染状矿体;3—矿化角斑岩;4—角斑岩;5—矿化石英脉及采样位置;6—断层

Fig.3 Relationship between ore bodies and wall rocks and sampling positions

- 1-Massive ore body; 2-Disseminated ore body; 3- Mineralized keratophyre; 4- Keratophyre;
- 5-Mineralized quartz vein and sampling position; 6-Fault

① 冶金工业部第一地质勘查局(二队). 浙江省绍兴县平水铜矿区 10-5 线-385 米—600 米标高地质详查报告, 2004: 1-99.

② 李春海. 平水铜矿地质特征、成矿时代和成矿模式. 南京大学 2008 年硕士学位论文, 2008: 1-57.

绢云母、石英,无色-白色,0.14~0.30 mm,他形粒状,包裹有黄铁矿、黄铜矿微小颗粒,因含大量流体包裹体而呈棉絮状,流体包裹体大小多在 25~50 μm ,以气/液比值为 10%~30%的气液两相包裹体为主,初步获得均一温度为 113~236 $^{\circ}\text{C}$ ($N < 15$) (另文发表)。个别石英重结晶呈短柱状,可能受后期热事件的影响,亦可见大颗粒石英碎裂后呈细小石英集合体。硫化物多为黄铁矿,少量黄铜矿,呈脉状、浸染状分布于石英脉中。黄铁矿,他形粒状,0.06~0.20 mm,表面溶蚀,包含有石英和黄铜矿细小颗粒,大颗粒者常具裂纹或已破裂成小颗粒,但仍见整体形态;黄铜矿,他形,0.04~0.10 mm,多分布在黄铁矿和石英颗粒之间,亦包含有早期细小黄铁矿和石英颗粒。绢云母,细小,常围绕石英颗粒呈集合体分布,总体方向与重结晶长柱状石英长轴方向一致,可能为后期热事件之产物。方解石,呈张性脉状分布于含矿石英脉中,偶含白铁矿细小颗粒,切割石英和绢云母集合体脉,代表最晚一次的成矿事件。

将上述含硫化物石英脉样品(07PS79)破碎后,用人工重砂方法在河北廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成锆石分离后,在双目显微镜下将锆石黏贴在环氧树脂表面,抛光后将待测锆石进行阴极发光(CL)图像分析。锆石 CL 图像照相在中国地质科学院离子探针中心完成,锆石定年在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室采用 ICP-MS 分析,仪器型号为 Agilent 7500a,激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统,分析时激光束斑直径为 30 μm ,激光脉冲重复频率为 5 Hz,实验原理和详细的测试方法见文献[4, 38-40]。每个锆石原位测试点的 U-Pb 年龄由分析时的 GLITTER 4.0 程序计算,获得同位素比值、年龄和误差,普通铅校正采用 Andersen T^[41]方法进行,结果用 ISOPLOT 程序 2.49 版本^[42]完成年龄计算和谐和图的绘制。在测试分析过程中用的标样为 STDGJ (598 \pm 9 Ma 和 602 \pm 9 Ma)。

3 测年结果与讨论

本次对含硫化物石英脉样品(07PS79)中 20 颗锆石进行了 ICP-MS U-Pb 定年(表 1)。测年锆石多为无色-淡棕色,自形-半自形,宽多在 50~100 μm ,长宽比多为 1:1,阴极发光图像(图 4)显示振荡环带结构,其 Th/U 比值为 0.49~1.27(平均值为 1.06),

多为岩浆活动时形成的锆石,部分锆石弱分带或核的边部隐约可见溶蚀现象。岩浆锆石通常具有特征的岩浆振荡环带,Th、U 含量较高和 Th/U 比值较大(一般 >0.4),变质锆石的 Th、U 含量低和 Th/U 比值小(一般 <0.1)^[43,44],而受热液蚀变作用影响的锆石为半自形到他形,无分带、弱分带或海绵状分带,常具有溶蚀结构或骨架状结构,对受热液蚀变作用影响较为彻底的锆石微区和/或颗粒进行 U-Pb 定年,可以得到热液蚀变作用发生的准确时代,对其中没有受热液蚀变作用的锆石区域进行 U-Pb 定年,可以得到这些岩石的形成年龄^[45-47]。

对年龄小于 1 Ga 的锆石样品点选用 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄较合适^[48],在 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 谐和图(图 5-A, B)上,所测年龄基本落于谐和线。据所测锆石年龄和 U、Th 含量及 Th/U 比值(图 5-C),把锆石年龄分为 5 组。

第 1 组包括 3、15、16 点,15、16 点的锆石呈短柱状(3 点锆石晶形较差),具有明显的振荡环带结构,不存在寄生核,Th 含量为 (236~20217) $\times 10^{-6}$,U 含量为 (297~27093) $\times 10^{-6}$,两者变化范围大,Th/U 比值为 0.56~0.80,年龄为 93~120 Ma,明显偏新,为后期热扰动事件的记录。

第 2 组包括第 11、19 点,Th 含量为 (151~629) $\times 10^{-6}$,U 含量为 (138~857) $\times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.73~1.09,年龄为 981~988 Ma,所测斑点位于锆石核部,可能代表捕获的锆石年龄。

第 3 组包括 1、2、4~10 点,Th 含量为 (48~287) $\times 10^{-6}$,U 含量为 (55~216) $\times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.88~1.33,年龄为 (926 \pm 13)Ma ($N=9$,MSWD=0.75),与矿区闪长岩年龄((932 \pm 7) Ma)^[49]相当。

第 4 组包括 12~14、20 点,Th 含量为 (441~6682) $\times 10^{-6}$,U 含量为 (404~5330) $\times 10^{-6}$,Th/U 比值为 1.09~1.27,年龄为 (950 \pm 15)Ma ($N=4$,MSWD=0.44),可能也是捕获锆石的年龄。

第 5 组包括 17、18 点,Th 含量为 (836~1987) $\times 10^{-6}$,U 含量为 (1078~4028) $\times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.49~0.77,年龄为 892~907 Ma (899 \pm 21 Ma,MSWD=0.47),与矿区内角斑岩年龄(904 \pm 8 Ma)和斜长花岗岩年龄(902 \pm 5 Ma)^[31]相当。

对于本文锆石年龄有两种可能的解释,第一种是含矿石英脉形成于新元古代早期,受到 93~120 Ma 的热事件影响;第二种是含矿石英脉形成于 93~

表 1 样品 07PS79 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法测年数据
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb spot analyses of zircons from sample 07PS79

| 测点 | $\omega(B)/10^{-6}$ | | Th/U | 同位素比值 | | | | 同位素年龄 (Ma) | | | | | | | |
|----|---------------------|----------|------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----|----|
| | Th | U | | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1σ | | |
| 1 | 78.4 | 72.88 | 1.08 | 0.06983 | 0.00238 | 1.49617 | 0.05032 | 0.15543 | 0.00277 | 923 | 40 | 929 | 20 | 931 | 15 |
| 2 | 79.96 | 74.45 | 1.07 | 0.06944 | 0.00253 | 1.49972 | 0.05372 | 0.15666 | 0.00289 | 912 | 44 | 930 | 22 | 938 | 16 |
| 3 | 1295.64 | 2316.37 | 0.56 | 0.05165 | 0.0014 | 0.10383 | 0.00286 | 0.01458 | 0.00023 | 270 | 35 | 100 | 3 | 93 | 1 |
| 4 | 231.4 | 183.65 | 1.26 | 0.07097 | 0.0018 | 1.50496 | 0.03892 | 0.15383 | 0.00245 | 957 | 28 | 932 | 16 | 922 | 14 |
| 5 | 67.14 | 67.99 | 0.99 | 0.0737 | 0.00213 | 1.54229 | 0.04505 | 0.15184 | 0.00257 | 1033 | 33 | 947 | 18 | 911 | 14 |
| 6 | 48.53 | 55.29 | 0.88 | 0.07108 | 0.00212 | 1.53418 | 0.04633 | 0.15659 | 0.00267 | 960 | 35 | 944 | 19 | 938 | 15 |
| 7 | 90.51 | 89.3 | 1.01 | 0.06942 | 0.00205 | 1.47335 | 0.04394 | 0.15395 | 0.0026 | 911 | 34 | 920 | 18 | 923 | 15 |
| 8 | 64.39 | 65.79 | 0.98 | 0.07299 | 0.00248 | 1.49478 | 0.05054 | 0.14856 | 0.00269 | 1014 | 40 | 928 | 21 | 893 | 15 |
| 9 | 180.03 | 151.54 | 1.19 | 0.07148 | 0.00186 | 1.56736 | 0.04219 | 0.15905 | 0.00261 | 971 | 29 | 957 | 17 | 951 | 15 |
| 10 | 287.6 | 216.84 | 1.33 | 0.07144 | 0.00159 | 1.52744 | 0.03627 | 0.15512 | 0.00245 | 970 | 25 | 941 | 15 | 930 | 14 |
| 11 | 151.65 | 138.8 | 1.09 | 0.07197 | 0.00177 | 1.64386 | 0.04253 | 0.1657 | 0.00273 | 985 | 27 | 987 | 16 | 988 | 15 |
| 12 | 1743.35 | 1376.97 | 1.27 | 0.07141 | 0.0021 | 1.58519 | 0.04717 | 0.16104 | 0.00275 | 969 | 34 | 964 | 19 | 963 | 15 |
| 13 | 441.29 | 404.64 | 1.09 | 0.07243 | 0.00169 | 1.58933 | 0.03913 | 0.15916 | 0.0026 | 998 | 25 | 966 | 15 | 952 | 14 |
| 14 | 983.13 | 810 | 1.21 | 0.07192 | 0.00247 | 1.56211 | 0.05357 | 0.15756 | 0.00293 | 984 | 40 | 955 | 21 | 943 | 16 |
| 15 | 236.61 | 297.19 | 0.8 | 0.05753 | 0.00223 | 0.14852 | 0.00572 | 0.01873 | 0.00034 | 512 | 53 | 141 | 5 | 120 | 2 |
| 16 | 20217.39 | 27093.45 | 0.75 | 0.05795 | 0.00186 | 0.14232 | 0.0046 | 0.01782 | 0.0003 | 528 | 42 | 135 | 4 | 114 | 2 |
| 17 | 1987.22 | 4028.84 | 0.49 | 0.06922 | 0.00235 | 1.41658 | 0.04738 | 0.14843 | 0.00263 | 905 | 40 | 896 | 20 | 892 | 15 |
| 18 | 836.04 | 1079.18 | 0.77 | 0.07158 | 0.00276 | 1.49141 | 0.05646 | 0.15113 | 0.0029 | 974 | 46 | 927 | 23 | 907 | 16 |
| 19 | 629.36 | 857.91 | 0.73 | 0.07486 | 0.00295 | 1.69679 | 0.06526 | 0.16443 | 0.0032 | 1065 | 47 | 1007 | 25 | 981 | 18 |
| 20 | 6682.62 | 5330.71 | 1.25 | 0.07206 | 0.00229 | 1.56174 | 0.04959 | 0.15721 | 0.00278 | 988 | 37 | 955 | 20 | 941 | 15 |

注:U-Pb 同位素定年在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室采用 ICP-MS 分析,误差为 1σ 。

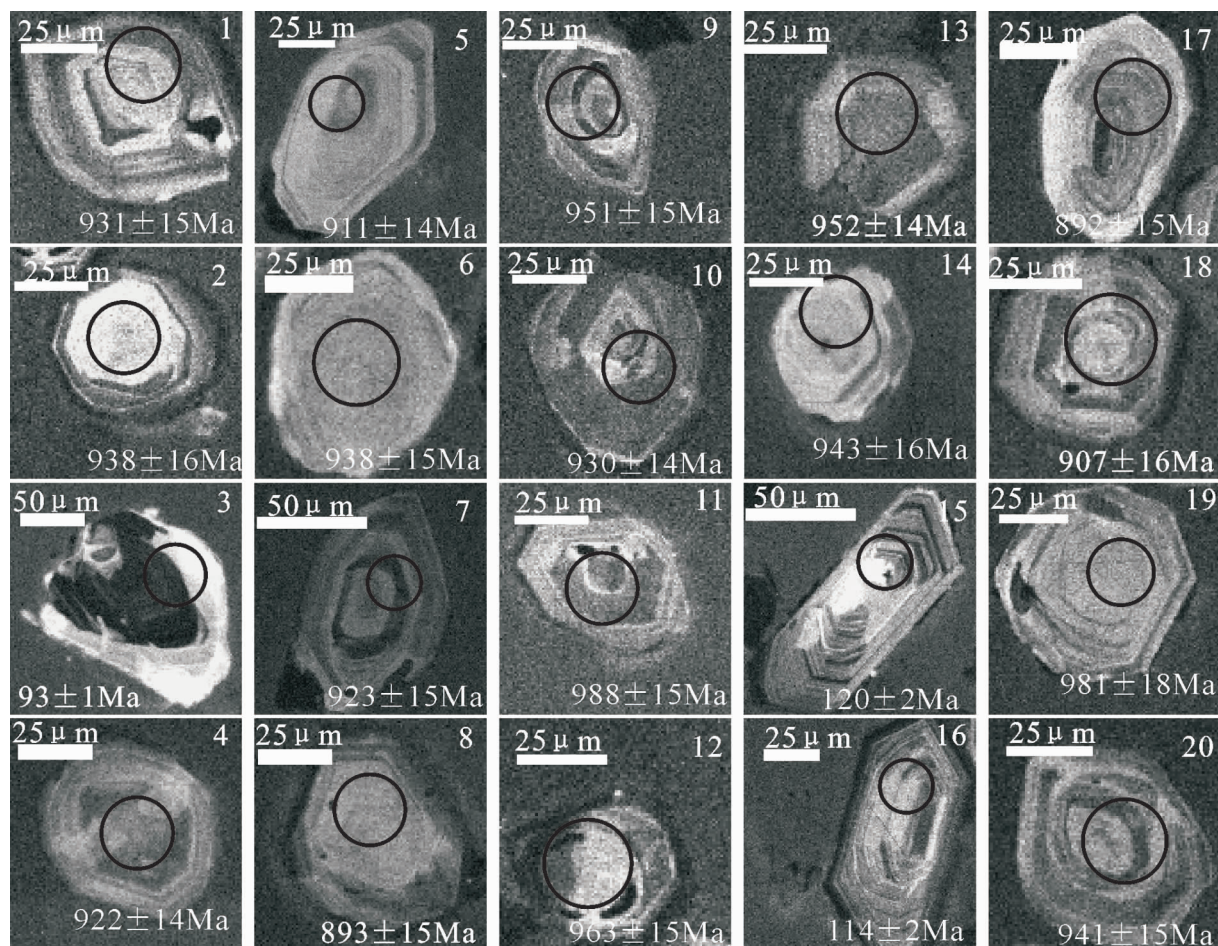


图4 平水铜矿 07PS79 样品锆石阴极发光图像

Fig.4 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from sample 07PS79 in the Pingshui copper deposit

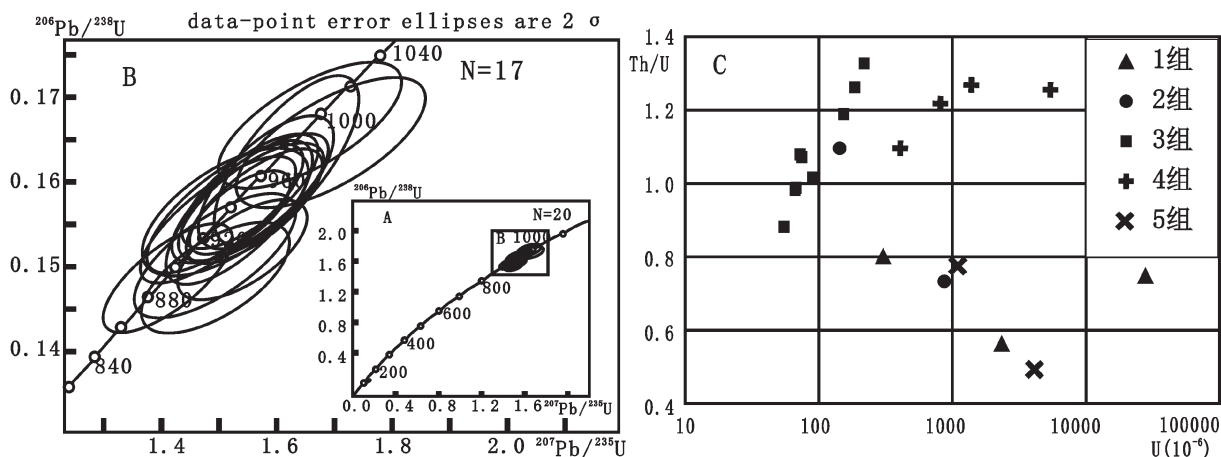


图5 平水铜矿 07PS79 样品中锆石 ICP-MS U-Pb 谐和线(左)及其 U-U/Th 图解(右)

Fig.5 ICP-MS U-Pb concordia (left) and their U-U/Th ratio diagram (right) for zircons from sample 07PS79 in the Pingshui copper deposit

120 Ma, 捕获了新元古代的锆石。笔者倾向于第一种解释, 并认为平水铜矿的成矿时代为新元古代早期; 白垩纪时发生了 (93~120) Ma 成矿叠加改造作用, 主要证据如下:

1) 矿化石英脉位于块状矿体之下, 并与浸染状矿体一起同步褶皱变形, 与浸染状矿体相互夹杂。矿石中石英等脉石矿物纹层、条带与黄铁矿等矿石矿物纹层、条带相间排列, 并同步褶皱变形, 具有一致的千枚理或片理, 表明石英脉与矿体是(准)同期形成的, 并且后期受到一定程度的热事件影响。2) 黄铁矿、石英是矿石中最主要的矿石矿物和脉石矿物, 成矿期内每一矿化阶段都存在石英和黄铁矿矿物, 在矿体形成过程中存在大量石英脉石矿物, 才有可能形成(准)同期的含矿石英脉。3) 笔者通过对块状、稠密浸染状、细脉状和稀疏浸染状矿石光片、薄片进行仔细的观察, 发现矿石中存在 4 个期次的他形粒状黄铁矿和石英矿物, 铜矿主要形成于石英-黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿的第三矿化阶段。早期石英多碎裂成三角状的“小島”, 黄铁矿颗粒常具裂纹, 或已破裂成小颗粒但仍见整体形态, 可能与海底火山喷发时淬火作用有关, 且早期石英常包含细小的早期硫化物^①, 局部石英矿物发生重结晶且不含矿或含矿较弱, 方向与绢云母集合体长轴总体排列方向一致, 为受后期热液作用影响形成; 方解石脉切割石英和绢云母集合体脉, 含白铁矿细小颗粒, 代表最晚一次的成矿事件^②。这些迹象表明成矿作用发生在早期, 受到后期热事件的叠加改造影响。4) 部分早期结晶锆石的核部或幔部有受到热事件影响而出现的溶蚀现象, 表明存在后期热事件的叠加改造作用。5) 矿化石英脉中锆石的 CL 图像显示, 锆石不存在寄生核。如果石英脉形成于 93~120 Ma, 捕获了新元古代的锆石, 那么至少有一部分锆石应该存在寄生核, 而本文测定的锆石并不存在寄生核, 进一步说明不可能是第二种情况。

既然平水铜矿含矿石英脉形成于早期, 那么哪组年龄是成矿的记录呢? 前文已述, 第 1 组锆石年龄暗示平水铜矿在白垩纪 (93~120 Ma) 发生了一次热事件, 对矿体起到了一定的叠加改造作用, 这与华南和中国东部地区燕山晚期 (98~125 Ma) 的岩浆活动和金属成矿期^[50~52]的时代基本一致, 也与平水矿区

外围分布着燕山期花岗岩类的地质事实相符。第 2 组年龄为捕获锆石年龄, 可能是格林威尔造山事件 (1190~980 Ma)^[53]的记录。第 3 组年龄与矿区闪长岩年龄相当, 但在 I 号主矿体-335 m 中段 2 线未见闪长岩侵入矿体, 地表闪长岩也未见矿化现象, 可能早于成矿期。第 4 组年龄早于闪长岩年龄, 可能也是捕获的早期锆石年龄, 这比扬子板块北缘新元古代岩体中捕获的 931~945 Ma 的早期锆石^[54]稍早。笔者倾向于第 5 组年龄为成矿年龄, 因为-335 m 中段 2 线块状矿体顶板围岩为角斑岩, 亦有浸染状矿化, 与成矿关系最为密切, 矿区内地表角斑岩亦有多处矿化现象, 地表矿体露头也主要赋存于角斑岩和花岗斑岩中, 且本组锆石与第 1 组热扰动事件锆石的 Th/U 比值范围 (< 0.80) 一致, 可能是成矿热事件的记录, 与扬子板块东南缘存在 900 Ma 左右的一次弧-陆碰撞事件^[55]吻合, 也与平水铜矿形成于岛弧背景的认识一致。至于矿区内斜长花岗岩与成矿作用的关系还有待深入调查研究。

对于平水铜矿成岩成矿年代问题, 许多学者进行了研究^[22,24]。最近报道的平水铜矿矿区角斑岩锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 (904±8) Ma, 锆石形态、大小、Th/U 比值 (0.34~0.66)^[31]与本次定年第 5 组锆石的特征基本相同, 其年龄亦基本一致。锆石 Hf 同位素研究表明, 平水地区在新元古代早期 (970~900 Ma) 可能存在一次显著的年轻岛弧地壳生长事件^[31], 进一步表明平水铜矿形成于新元古代早期的岛弧背景。因此, 本文所获得的成矿年龄为深入了解平水 VHMSD 的成因提供了准确的年代学证据; 也为在钦杭结合带中寻找此类型矿床提供了年代学信息。

4 结 论

1) 测得平水铜矿含硫化物石英脉中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法年龄有 5 组, 分别为 (981~988) Ma、(950±15) Ma、(926±13) Ma、(899±21) Ma 和 (93~120) Ma。

2) 成矿期为新元古代早期, 成矿年龄为 (899±21) Ma, 白垩纪时发生了 (93~120) Ma 的成矿叠加改造作用。

3) 平水铜矿形成于新元古代早期的岛弧背景, 矿化石英脉和矿石组构特征亦显示其可能与海底火山

①李春海. 平水铜矿地质特征、成矿时代和成矿模式. 南京大学 2008 年硕士学位论文, 2008: 1-57.

喷发作用有关。

致谢:在野外工作中得到绍兴平铜集团有限公司孟农灿、楼海高、冯建江和郑宝康工程师的大力帮助和实地指导,在论文成文过程中得到顾连兴、张传林、郭坤一、高天山等教授的指导,ISOPLOT 软件操作上得到贺振宇和余明刚博士的帮助,匿名评审专家和编辑对本文提出了许多修改建议,在此一并致以衷心感谢。

参考文献 (References):

- [1] 陆松年. 新元古代时期 Rodinia 超大陆研究进展述评 [J]. 地质论评, 1998, 44(5):489-495.
Lu Songnian. A review of advance in the research on the Neoproterozoic Rodinia supercontinent [J]. Geological Review, 1998, 44 (5):489-495(in Chinese with English abstract).
- [2] He J R, Wang A G, Rui X J, et al. Ore-bearing formations of the Precambrian in south China and their prospects [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2):375-379.
- [3] 万天丰. 中国大地构造学纲要 [M]. 北京:地质出版社, 2004: 48-75.
Wan Tianfeng. An Outline in Tectonics of China [M]. Beijing: Geol. Pub. House, 2004:48-75 (in Chinese).
- [4] He Z Y, Xu X S, Yu Y, et al. Origin of the late Cretaceous syenite from Yandangshan, SE China, constrained by zircon U - Pb and Hf isotopes and geochemical data [J]. International Geology Review, 2009, 5(6):556-582.
- [5] 水涛, 徐步台, 梁如华, 等. 绍兴-江山古陆对接带 [J]. 科学通报, 1986, 6:444-448.
Shui Tao, Xu Butai, Liang Ruhua, et al. Shaoxing - Jiangshan amalgamated zone of old lands [J]. Chinese Science Bulletin, 1986, 6:487-489 (in Chinese).
- [6] 周新民, 朱云鹤. 江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质 [J]. 中国科学(B), 1992, 22(3):296-303.
Zhou Xinmin, Zhu Yunhe. Magmatic mixing of Jiangshan - Shaoxing fracture belt and related Precambrian geology [J]. Science in China (Series B), 1992, 22(3):298- 303 (in Chinese).
- [7] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China?[J] Earth Planet Sci. Lett., 1999, 173:171-181.
- [8] Li X H. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: timing of the Neoproterozoic Jinning orogeny in SE China and implications for Rodinia assembly [J]. Precambrian Res., 1999, 97:43-57.
- [9] Roy A B. Neo-proterozoic crustal evolution of northwestern Indian shield: implications on breakup and assembly of supercontinents [J]. Gond. Res., 2001, 4:289-306.
- [10] Li Z X, Li X H, Zhou H, et al. Grenvillian continental collision in South China: new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia [J]. Geology, 2002, 30:163-166.
- [11] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. Precambrian Res., 2003, 122: 85-109.
- [12] 廖宗廷, 马婷婷, 周征宇, 等. Rodinia 裂解与华南微板块形成和演化 [J]. 同济大学学报, 2005, 33(9):1183-1190.
Liao Zhongting, Ma Tingting, Zhou Zhengyu, et al. Review on Rodinia and tectonics in South China [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(9):1183-1190 (in Chinese with English abstract).
- [13] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from northern Guangxi, South China: implications for tectonic evolution [J]. Precambrian Res., 2006, 145:111-130.
- [14] Xiao L, Zhang H F, Ni P Z, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of Early Neoproterozoic mafic -intermediate intrusions from NW margin of the Yangtze Block, South China: implication for tectonic evolution [J]. Precambrian Res., 2007, 154: 221-235.
- [15] Ling W, Gao S, Zhang B, et al. Neoproterozoic tectonic evolution of Yangtze craton, South China: implications for amalgamation and break-up of Rodinia Supercontinent [J]. Precambrian Res., 2003, 122:111-140.
- [16] Wang J, Li Z X. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia breakup [J]. Precambrian Res., 2003, 122:141-158.
- [17] Zheng Y F. Position of South China in configuration of Neoproterozoic supercontinent [J]. Chin. Sci. Bull., 2004, 49: 751-753.
- [18] Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, et al. Neoproterozoic arc - related mafic intrusions along the northern margin of South China: implications for the accretion of Rodinia [J]. J. Geol., 2002, 110: 611-618.
- [19] Zhou M F, Zhou M, Ma Y X, et al. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): a Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block [J]. Precambrian Res., 2006, 144:19-38.
- [20] Jiang G Q, Sohl L E, Blick N C. Neoproterozoic stratigraphic comparison of the Lesser Himalaya (India) and Yangtze Block (South China): paleogeographic implications [J]. Geology, 2003, 31:917-920.
- [21] Zhou J C, Wang X L, Qiu J S, et al. Geochemistry of Meso- and Neo-proterozoic mafic-ultramafic rocks from northern Guangxi, China: arc or plume magmatism [J]? Geochem. J., 2004, 38:139-152.
- [22] 王执均, 赵筱富. 西裘铜矿床特征及其成因探讨 [J]. 地质与勘探, 1980, 2:19-24.
Wang Zhijun, Zhao Xiaofu. Geology and genesis of the Xiqiu

- copper deposit [J]. *Geology and Prospecting*, 1980, 2:19-24 (in Chinese with English abstract).
- [23] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1989:1-688.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. *Regional Geology of Zhejiang Province* [M]. Beijing: Geol. Pub. House, 1989:1-688 (in Chinese with English abstract).
- [24] 黄有年. 浙江西裘含铜块状硫化物矿床特征及成矿模式 [J]. 地质找矿论丛, 1992, 7(3):22-34.
Huang Younian. Characteristics of Xiqiu Cu -massive sulfide deposit, Zhejiang and the metallogenic model [J]. *Contributions to Geology and Mineral resources Research*, 1992, 7 (3):22-34 (in Chinese with English abstract).
- [25] 徐跃通, 尚树川, 张邦花. 浙江西裘铜块状硫化物矿床火山-热泉沉积成矿的地质地球化学证据 [J]. 地球化学, 2000, 29 (1): 14-20.
Xu Yuetong, Shang Shuchuan, Zhang Banghua. Evidence for metallogenic geochemistry of volcano-hot spring deposition in Xiqiu Copper Massive Sulfide Deposit, Zhejiang Province [J]. *Geochemica*, 2000, 29 (1):14-20 (in Chinese with English abstract).
- [26] 侯增谦, 韩发, 夏林圻, 等. 现代与古代海底热水成矿作用 [M]. 北京:地质出版社, 2003:62-92.
Hou Zengqian, Han Fa, Xia Linqi, et al. *Hydrothermal Solutions Mineralization of Modern and Ancient Sea-floor* [M]. Beijing: Geol. Pub. House, 2003:62-92(in Chinese).
- [27] 祁岷, 周新民, 王德滋. 浙江西裘细碧角斑岩系的成因与相关幔源花岗岩类的特征 [J]. 岩石矿物学杂志, 1986, 5(4):299-308.
Qi Qu, Zhou Xinmin, Wang Dezi. The origin of the spilite-keratophyre series and the characteristic of the related mantle-derived granitic rocks in Xiqiu, Zhejiang [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 1986, 5 (4):299-308 (in Chinese with English abstract).
- [28] 沈渭洲, 凌洪飞, 章邦桐. 江南元古宙古岛弧基底变质岩的 Sm-Nd 同位素研究 [J]. 南京大学学报, 1993, 29(3):460-467.
Shen Weizhou, Ling Hongfei, Zhang Bangtong. Sm-Nd isotopic studies on metamorphic basement rocks of the Jiangnan Proterozoic paleo-island arc [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1993, 29(3):460-467 (in Chinese with English abstract).
- [29] 林清龙. 浙江平水群细碧角斑岩形成环境及其物质来源探讨 [J]. 中国区域地质, 1992, 3:257-265.
Lin Qinglong. The formation environment and material source of spilite-keratophyres of the Pingshui Group in Zhejiang [J]. *Geological Bulletin of China*, 1992, 3:257-265 (in Chinese with English abstract).
- [30] 唐洪峰, 李武显, 周新民. 浙赣皖交界区新元古代火山-沉积岩系的比较 [J]. 地质学报, 1998, 72(1):34-41.
Tang Hongfeng, Li Wuxian, Zhou Xinmin. Comparison of Neoproterozoic volcanic-sedimentary rocks from the Zhejiang-Jiangxi-Anhui border area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1998, 72 (1): 34-41 (in Chinese with English abstract).
- [31] Chen Z H, Xing G F, Guo K Y, et al. Petrogenesis of keratophyres in the Pingshui Group, Zhejiang: constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54 (9): 1570-1578.
- [32] 徐跃通. 浙江西裘晚元古代层状硅质岩热水沉积地球化学标志及其沉积环境意义 [J]. 地球化学, 1996, 25(6):600-608.
Xu Yuetong. The geochemical characteristics of hydrothermal sediment chert of the late Proterozoic era and their sedimentary environmental implication in Xiqiu area, Zhejiang Province [J]. *Geochemica*, 1996, 25 (6):600-608 (in Chinese with English abstract).
- [33] 翟伟, 袁桂邦, 李兆麟, 等. 粤西河台金矿床富硫化物含金石英脉锆石 U-Pb 测年及成矿意义 [J]. 地质论评, 2005, 15(3):340-346.
Zhai Wei, Yuan Guibang, Li Zhaolin, et al. U-Pb isotope age of zircons in gold-bearing quartz veins from the Hetai gold deposit, western Guangdong, China: constraints on the timing of gold metallogenesis [J]. *Geological Review*, 2005, 15 (3):340-346 (in Chinese with English abstract).
- [34] 浙江省地质矿产志编纂委员会. 浙江省地质矿产志 [M]. 北京: 方志出版社, 2003: 283-286.
Committee of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. *Regional Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province* [M]. Beijing: Fangzhi Publishing House, 2003:283-286 (in Chinese).
- [35] 刘继顺. 喷流沉积成矿作用研究的若干问题 [J]. 矿产与地质, 1996, 10(1):6-10.
Liu Jishun. Some problems in studies of the exhalative sedimentary mineralization [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1996, 10(1):6-10 (in Chinese with English abstract).
- [36] Clauze L J, King R W, Kerrich R. Archean hydrothermal zircon populations in Abitibi greenstone belt: constraints on the timing of gold mineralization [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 98: 109-128.
- [37] 陆松年, 李怀坤, 李惠民. 成矿地质事件的同位素年代学研究 [J]. 地学前缘, 1999, 6 (2):335-342.
Lu Songnian, Li Huaikun, Li Huimin. Research on isotopic geochronology of mineralization events [J]. *Earth Sciences Frontiers*, 1999, 6 (2):335-342(in Chinese with English abstract).
- [38] Norman M D, Pearson N J, Sharma A, et al. Quantitative analysis of trace elements in geological materials by laser ablation ICPMS: Instrumental operating condition and calibration values of NIST glasses [J]. *Geostandards Newsletter*, 1996, 20:247-261.
- [39] Belousova E A, Griffin W L, Shee S R, et al. Two age populations of zircons from the Timber Creek kimberlites, Northern Territory, as determined by laser-ablation ICP-MS analysis [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48:757-765.
- [40] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation microprobe inductively coupled plasma-mass

- spectrometry (LAM-ICP-MS) to in situ U-Pb zircon geochronology [J]. *Chem. Geol.*, 2004, 211:47-69.
- [41] Andersen T. Corrections of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem. Geol.*, 2002, 192:59-79.
- [42] Ludwig K R. Isoplot / Ex, rev. 2.49: A geochronological toolkit for microsoft excel [M]. Berkeley geochronological center: Special Publication, 2001, 1:58.
- [43] Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps [M]. *Cathodoluminescence in Geoscience*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2000:373-400.
- [44] Moller A, O'Brien P J, Kennedy A, et al. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: an example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland (SW Norway) [M]. *EMU Notes in Mineralogy*, 2003, 5:65-82.
- [45] Liati A, Gebauer D, Wysoczanski R. U-Pb SHRIMP-dating of zircon domains from UHP garnet-rich mafic rocks and late pegmatoids in the Rhodope zone (N Greece): Evidence for Early Cretaceous crystallization and Late Cretaceous metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184:281-299.
- [46] Tomaschek F, Kennedy A K, Villa I M, et al. Zircons from Syros, Cyclades, Greece—recrystallization and mobilization of zircon during high-pressure metamorphism [J]. *Jour. of Petrology*, 2003, 44(11):1977-2002.
- [47] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. *科学通报*, 2004, 49(16):1589-1604.
Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. The genetic mineralogical study of zircon and its contributions to interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2004, 49(16):1589-1604(in Chinese).
- [48] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimbelites [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, 64:133-147.
- [49] Chen Z H, Guo K Y, Dong Y G, et al. Possible early Neoproterozoic magmatism associated with slab window in the Pingshui segment of the Jiangshan-Shaoxing suture zone: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and geochemistry [J]. *Sci. in China (Series D)*, 2009, 52(7):925-939.
- [50] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿用的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(4):289-299.
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, et al. Geodynamic settings of Mesozoic large scale mineralization in North China and vicinity: revealed from the accurate age determination of ore deposits [J]. *Sci. in China (Series D)*, 2003, 33 (4):289-299 (in Chinese).
- [51] 毛景文, 李晓峰, Lehmann B, 等. 湖南芙蓉锡矿地质特征、锡矿石和有关花岗岩的 Ar-Ar 测年及其成岩成矿的地球动力学意义 [J]. *矿床地质*, 2004, 22(2):164-175.
- Mao Jingwen, Li Xiaofeng, Lehmann B, et al. Ar-Ar dating of tin ores and related granite in Furong tin orefield, Hunan Province and its geodynamic significance [J]. *Mineral Deposits*, 2004, 22 (2): 164-175(in Chinese with English abstract).
- [52] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用 [J]. *矿床地质*, 2005, 24(2):99-107.
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, et al. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China [J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(2):99-107(in Chinese with English abstract).
- [53] 周金城, 王孝磊, 邱检生. 江南造山带是否格林威尔造山带? ——关于华南前寒武纪地质的几个问题 [J]. *高校地质学报*, 2008, 14(1):64-72.
- Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng. Is the Jiangnan orogenic belt a Grenvillia orogenic belt: some problems about the Precambrian geology of South China[J]. *Geological Journal of China University*, 2008, 14(1):64-72(in Chinese with English abstract).
- [54] 凌文黎, 高山, 程建萍, 等. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的制约 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(2):387-396.
- Ling Wenli, Gao Shan, Cheng Jianping, et al. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its north margin and their tectonic implication: constraint from the ELA-ICP-MS U-Pb geochronology of zircons from the Huangling and Hannan complexes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(2):387-396(in Chinese with English abstract).
- [55] Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Reworking of juvenile crust: element and isotope evidence from neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Res.*, 2006, 146:179-212.

LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from sulfide-bearing quartz veins in the Pingshui copper deposit, Zhejiang Province, and its geological implications

LI Chun-hai^{1,2}, XING Guang-fu², JIANG Yao-hui¹, DONG Yong-guan²,
YU Xi-ming³, CHEN Zhi-hong², JIANG Yang², CHEN Rong²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 2. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 3. Shaoxing Pingtong Group Co. Ltd., Shaoxing 312050, Zhejiang, China)

Abstract: The Pingshui copper deposit in Zhejiang Province is a typical volcanics-hosted massive sulfide deposit (VHMSD) in the northeast part of Qinzhou-Hangzhou collision belt between Yangtze and Cathaysia blocks. Its copper mineralization occurred mainly in the quartz-pyrite-chalcopyrite-sphalerite stage. This paper reports LA-ICP-MS U-Pb ages of zircon from sulfide-bearing quartz veins beneath the massive ore body. The results of dating are (981~988) Ma, (950±15) Ma, (926±13) Ma, (899±21) Ma and (93~120) Ma. CL images and Th/U ratios of the zircons show that both Neoproterozoic and Cretaceous zircons are almost of magmatic origin. Geological evidence and the findings indicate that the ore deposit was formed in the Neoproterozoic (~899 Ma) and the ores were affected by Cretaceous (93~120 Ma) thermal event. These results are of great significance for further researches on the genesis, formation and evolution of the Pingshui copper deposit and also provide chronological information in search for contemporaneous VHMSD along the Qinzhou-Hangzhou collision belt between Yangtze and Cathaysia blocks.

Key words: Neoproterozoic; U-Pb zircon dating; VHMSD; Pingshui copper deposit; Zhejiang Province; Qinzhou-Hangzhou collision belt

About the first author: LI Chun-hai, male, born in 1979, doctor candidate and engineer, majors in economic geology; E-mail: clark3223@yahoo.com.cn.