

文章编号: 0254-5357(2015)01-0138-12

DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.2015.01.018

江西冷水坑火山-侵入杂岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义

余明刚^{1,2}, 赵希林^{2*}, 钱迈平², 段政², 张雪辉², 万浩章³, 肖茂章³, 孙建东²

(1. 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093; 2. 南京地质矿产研究所, 江苏南京 210016;

3. 江西省地质矿产勘查开发局九一大队, 江西鹰潭 335001)

摘要: 江西冷水坑矿田是武夷山地区重要的银铅锌矿集中区之一, 以斑岩型矿床和火山沉积-热液改造型矿床为特色, 前人对冷水坑矿床的成岩成矿作用、控矿构造、成矿模式等开展了大量的研究, 但对不同地质体与成矿的先后关系、岩浆活动期次与成矿作用的关系研究相对薄弱。本文对打鼓顶组火山岩和含矿花岗斑岩进行了激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)锆石U-Pb年代学研究, 结果表明打鼓顶组底板、顶板晶屑凝灰岩形成时代分别为 161.3 ± 1.3 Ma、 160.75 ± 0.96 Ma, 含矿花岗斑岩形成时代为 168.09 ± 0.80 Ma, 结合以往研究资料, 将冷水坑矿田火山-侵入岩岩浆活动划分为3个期次: 第Ⅰ期火山-侵入岩浆活动形成于 $164 \sim 170$ Ma; 第Ⅱ期火山-侵入岩浆活动发生于 $157 \sim 161$ Ma, 为火山沉积-热液改造型矿床和斑岩型矿体的主要成矿时代, 岩浆活动和成矿时代基本一致; 第Ⅲ期火山-侵入岩浆活动时限为 $140 \sim 146$ Ma。也暗示华南冷水坑等地晚侏罗世火山岩形成于华南中生代构造体制转换的关键时期, 为华南晚中生代构造背景的研究提供了重要地质依据。

关键词: 打鼓顶组; 含矿花岗斑岩; 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS); 锆石U-Pb定年; 构造转换; 江西冷水坑

中图分类号: O657.63; P588.121

文献标识码: A

冷水坑银铅锌矿田位于江西省贵溪市境内, 地处环太平洋金属成矿带的外带, 中国东南部陆相火山岩带的北西部。冷水坑特大型银铅锌矿包含两种不同成因类型的矿床: 一类是斑岩型矿床, 主要包括银路岭、鲍家、银珠山3个矿区; 另一类为火山沉积-热液改造型矿床, 主要包括下鲍、银坑、营林、小源4个矿区^[1-3]。前人对冷水坑斑岩型矿床作了系统的研究, 如地质特征、岩石地球化学、同位素特征、流体包裹体、热液蚀变、矿床年代等^[4-12]; 同时, 近年来随着层状矿体的发现和重视, 对冷水坑地区火山沉积-热液改造型矿床的研究程度也日益深入, 特别是对层状矿体的地质特征、铁锰碳酸盐角砾岩成因、成矿模式、形成时代等作了详细研究, 积累了丰富的地质资料^[13-19]。最新研究结果表明, 冷水坑矿区打鼓顶组和鹅湖岭组年龄为 $146 \sim 160$ Ma^[3,11,16-19], 冷水坑矿

田花岗斑岩年龄为 $150 \sim 163$ Ma^[8-12,16-18], 冷水坑矿床成矿年龄有两组, 分别为 163 Ma^[10]和 127 Ma^[3], 而盆地地表出露打鼓顶组和鹅湖岭组火山岩年龄为 $137 \sim 144$ Ma, 与成矿密切相关的火山-次火山岩的成岩年龄为 $135 \sim 144$ Ma^[20]。针对同一地质体运用不同测试方法得出的年龄结果不尽相同, 最大可差 30 Ma, 可能暗示着矿区存在多期岩浆活动, 但不同地质体与成矿先后关系、岩浆活动的期次与成矿作用关系尚不清楚。另外, 与冷水坑矿床相邻相山、大桥坞、石溪等盆地的打鼓顶组、鹅湖岭组层型剖面年龄集中于 $134 \sim 140$ Ma之间^[21-24], 这与冷坑矿床打鼓顶组和鹅湖岭组火山岩年龄相差甚大, 火山活动的迁移性不能解释这种同一层位较大的年龄差异性, 因而冷水坑矿田火山岩地层归于打鼓顶组和鹅湖岭组是否合适, 需要进一步认定。

收稿日期: 2014-04-28; 修回日期: 2014-08-01; 接受日期: 2014-12-12

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(12120113065200, 1212011121099, 12120113070800)

作者简介: 余明刚, 在读博士研究生, 主要从事华南火山岩研究。E-mail: ymg1003@126.com。

通讯作者: 赵希林, 助理研究员, 主要从事岩浆岩研究。E-mail: zx124@126.com。

针对上述问题,本文对斑岩型矿床和火山沉积-热液改造型矿床进行系统的研究,选择下鲍矿段132勘探线穿脉打鼓顶组火山岩顶、底板岩石及130勘探线钻孔(ZK13001)含矿花岗斑岩应用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)技术进行锆石U-Pb年代学研究,结合前人资料,对冷水坑矿床多期岩浆活动的期次与成矿作用的关系、火山岩地层的区域对比等问题开展研究,为矿床的形成机制及成因研究提供信息。

1 地质背景

冷水坑超大型 Ag - Pb - Zn 矿田位于江西和福

建交界的月凤山地区,大地构造位置处于萍乡—江山—绍兴结合带南侧,属于北武夷山火山岩带,由天台山、月凤山两个火山盆地组成,其中冷水坑矿田位于月凤山盆地的北西。区域上主要受 NE 向鹰潭—安远深断裂及 EW 向广丰—萍乡深断裂的复合控制(见图 1)。该盆地是在 NE—NNE 向构造断陷盆地的基础上,由火山喷发进一步沉积而形成的。研究区基底地层为震旦系老虎塘组(Z_2l),岩性主要为石英云母片岩、黑云斜长片麻岩等变质岩;少量石炭系黄龙组(C_2h)和梓山组(C_1z)地层,岩性主要为石英砂砾岩、云母石英砂岩、粉砂岩夹页岩等组成。盆地上部地层主要为一套侏罗系陆相火山岩,分为

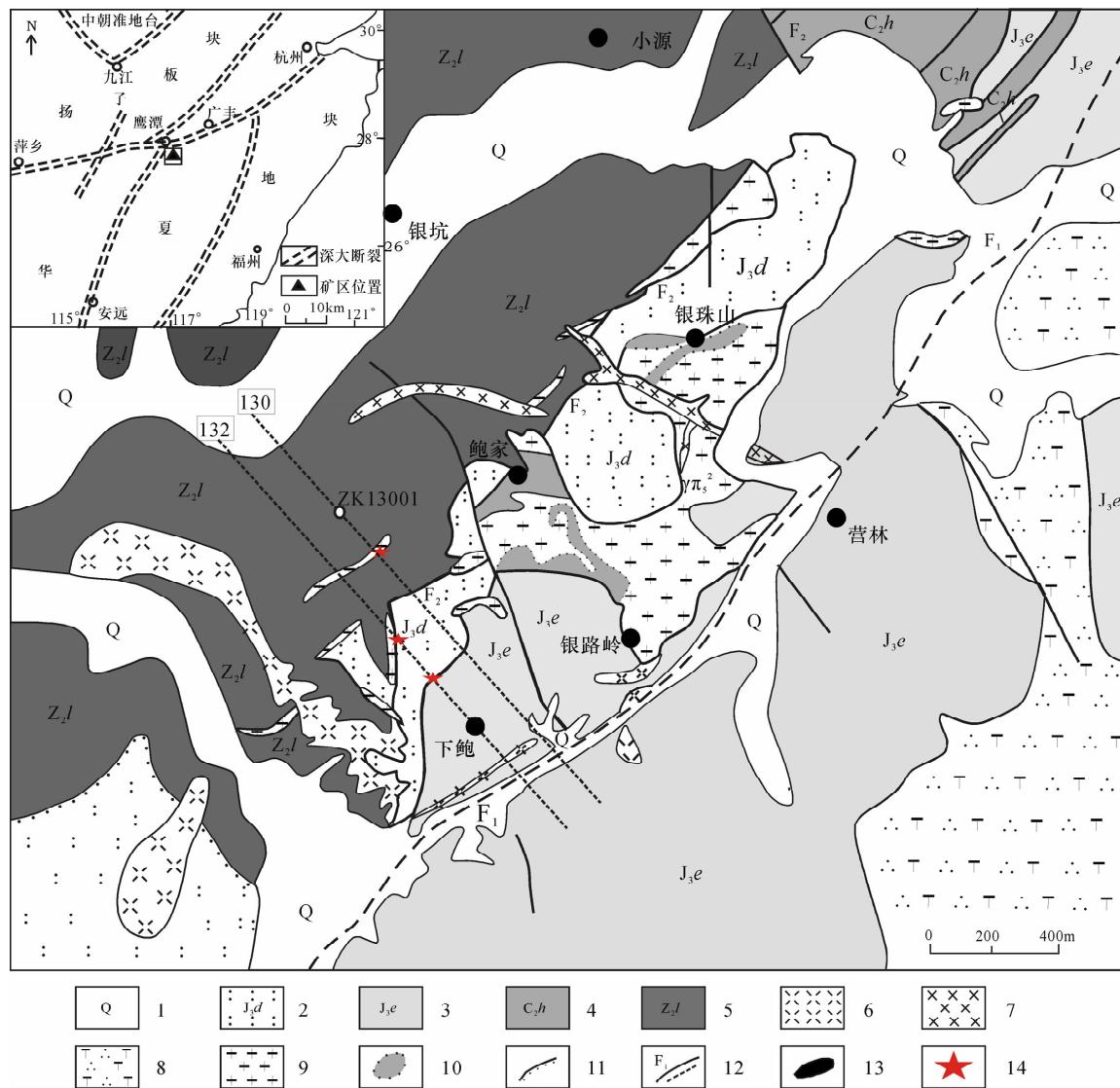


图 1 冷水坑矿床地质略图(据文献[1]修改)

Fig. 1 Geological sketch map of the Lengshuikeng deposit (Modified from Reference [1])

1—第四系;2—侏罗系打鼓石组;3—侏罗系鹅湖岭组;4—石炭系黄龙组和梓山组;5—震旦系老虎塘组;6—流纹斑岩;7—钾长花岗斑岩;8—石英正长斑岩;9—含矿花岗斑岩;10—隐爆角砾岩;11—地层不整合界线;12—实测、推测断层及编号;13—矿体;14—锆石采样位置。

打鼓顶组(J_3d)和鹅湖岭组(J_3e),均为火山-沉积建造,打鼓顶组主要见于矿田深部,岩性组合为砂砾岩、流纹质晶屑凝灰岩为主,夹菱铁锰矿层、硅质岩等,打鼓顶组喷发不整合于石炭系或震旦系地层之上。鹅湖岭组(J_3e)广泛分布于矿田中,岩性组合为晶屑凝灰岩、流纹岩、砂岩夹菱铁锰矿层,它们是冷水坑火山沉积-热液改造型银铅锌矿体的主要赋存层位^[1-3]。此外,在该火山盆地中,特别是在冷水坑矿区及外围侵入岩(或次火山岩)较为发育,岩性主要为早期的花岗斑岩,晚期的流纹斑岩、钾长花岗斑岩及石英正长斑岩。

2 岩石学特征

本次工作选择下鲍矿段132勘探线打鼓顶组顶、底板晶屑凝灰岩(样品号分别为:11LS-1、11LS-3)及130勘探线钻孔(样品号:11ZK13001)含矿花岗斑岩进行了系统采样,主要岩石特征如下。

富晶屑凝灰岩:晶屑凝灰结构,主要由晶屑(50%~70%)、刚性玻屑(5%~15%)、岩屑(5%~15%)及更细的火山尘(10%)和铅锌矿物(5%)组成。晶屑由石英(30%)、钾长石(20%)、斜长石(15%)、黑云母(2%)组成。岩屑总体含量少,主要有粒状石英集合体岩屑、碳酸盐岩屑及石英岩岩屑3种类型。火山尘:普遍具不同程度绢云母化、黏土化、碳酸盐化、硅化。岩石铅锌矿化明显,有少量黄铁矿化。

花岗斑岩:斑状结构,岩石由斑晶(20%±)和基质(80%±)组成,斑晶由石英(12%)、钾长石(5%)、黑云母(3%)组成。基质具显微花岗结构,主要由长英质矿物组成,绢云母化强烈,黄铁矿浸染状不均匀少量分布。

3 锆石U-Pb定年分析

3.1 锆石U-Pb定年分析方法

阴极发光图像分析:锆石分选采用重砂方法完成,首先将约10 kg岩石样品破碎到80~100目,再经重砂淘选和电磁选,分选出无磁性重矿物样品,随机挑选出约200颗锆石颗粒,制成样品靶。制靶后的锆石样品,在U-Pb定年之前先进行阴极发光图像分析。图像分析在南京大学内生金属成矿机制研究国家重点实验室应用JEOL JXA-8100电子探针仪完成,工作条件为:加速电压15 kV,束电流 2×10^{-8} A,束斑直径1 μm。

锆石U-Pb年龄测定:主要在南京大学成矿作

用国家重点实验室应用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)完成。ICP-MS仪器型号为Agilent 7500a,激光剥蚀系统为New Wave UP213激光器($\lambda = 213$ nm)。工作参数为:等离子气体(Ar)流量1.6 L/min,辅助气体(Ar)流量1 L/min,剥蚀物质载气(He)流量0.9~1.2 L/min,激光脉冲频率5 Hz,激光束斑直径30 μm,剥蚀时间90 s,背景测量时间40 s,脉冲能量10~20 J/cm²,用外标锆石GEMOC/GJ-1(609 Ma)^[25],ICP-MS的分析数据通过即时分析软件GLITTER^[26]计算获得同位素比值、年龄和误差,普通铅按照Andersen^[27]的方法进行校正,校正后的数值应用Isoplot/Ex Version 3.23^[28]完成锆石U-Pb年龄谐和图及²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄的加权平均值。详细的分析方法和流程见Jackson等^[25]和Xu等^[29]。

3.2 U-Pb定年分析结果

样品典型锆石阴极发光图像特征见图2,锆石U-Pb定年结果列于表1。

底板晶屑凝灰岩(11LS-1):锆石颗粒均自形,浅黄褐色,短柱状、长柱状,长度约70~200 μm。本次研究共对22颗锆石进行了LA-ICP-MS测试,测试结果显示所有测点的Th/U比值介于0.85~1.75,且具有清晰的振荡环带,显示岩浆锆石的特征^[30]。在²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U谐和图上,所有点都集中落在谐和曲线上,其中21个点的²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为 161.3 ± 1.3 Ma,MSWD=0.24(图3),代表了晶屑凝灰岩的形成年龄;测点11LS1-03的年龄相对较大,年龄为 208 ± 4 Ma,可能为捕获锆石。

顶板晶屑凝灰岩(11LS-3):锆石颗粒均自形,浅黄褐色,短柱状、长柱状,长度约100~200 μm。本次研究共对30颗锆石进行了LA-ICP-MS测试,测试结果显示所有测点的Th/U比值介于0.85~3.85,且具有清晰的振荡环带,显示岩浆锆石的特征。其中28个点的²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为 160.75 ± 0.96 Ma,MSWD=0.54(图3),代表了晶屑凝灰岩的形成年龄;测点11LS-3-05、11LS-3-10测点年龄相对较大,年龄分别为 182 ± 2 Ma和 242 ± 3 Ma,可能为捕获锆石。

含矿花岗斑岩(11ZK13001):锆石颗粒均自形,浅褐色,短柱状、长柱状,长度约60~150 μm。本次研究共对18颗锆石进行LA-ICP-MS测试,测试结果显示所有测点的Th/U比值介于0.43~2.09,振荡环带发育,显示岩浆锆石的特征。在²⁰⁷Pb/²³⁵U

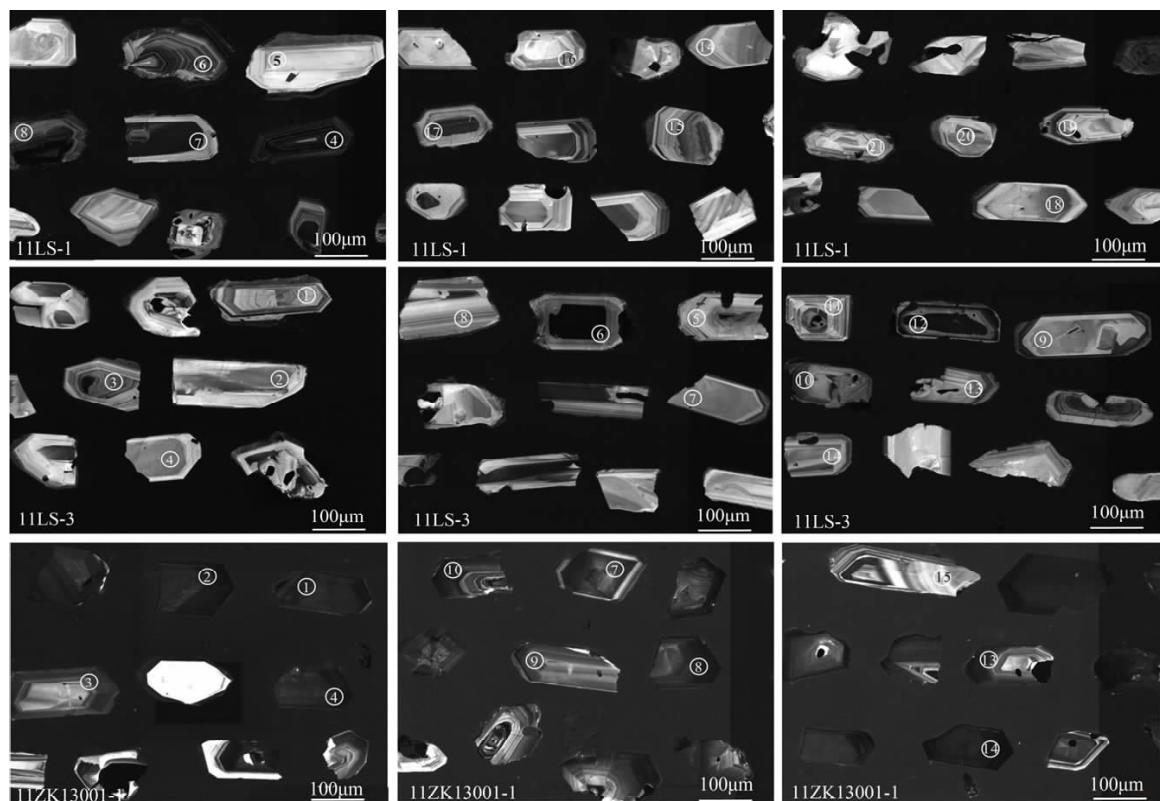


图2 典型锆石阴极发光图像分析

Fig. 2 Typical cathodoluminescence images of zircons

$-^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图上,所有点都集中落在谐和曲线上,18个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 168.09 ± 0.80 Ma, MSWD = 0.29(图3),代表了花岗斑岩的结晶年龄,表明冷水坑矿田存在中侏罗世的岩浆活动。

以上LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学结果表明,冷水坑打鼓顶组火山岩形成时限为晚侏罗世,火山岩和侵入岩年龄基本一致,表明 $160 \sim 168$ Ma 是火山沉积-热液改造型矿床和斑岩型矿体的主要成矿时代。结合其他学者研究成果,准确地厘定了冷水坑火山-侵入杂岩的形成时代,这为我们系统探讨冷水坑矿床形成机制及成因提供了依据,同时冷水坑晚侏罗世火山岩的发现也为我们探讨华南中生代构造背景提供了信息,在此将逐一论述。

4 冷水坑矿田岩浆岩活动期次与成矿作用关系

4.1 冷水坑矿田岩浆活动

冷水坑矿田内成矿作用与晚中生代岩浆活动密切相关,已有多篇文献报道了冷水坑Ag-Pb-Zn矿密切相关的火山岩、含矿花岗斑岩以及次火山岩

的年龄(表2)。这些高精度的同位素定年工作反映了该区中生代应该经历了多期次、多岩性的复杂成岩-成矿过程。

邱骏挺等^[16]测得天华山盆地冷水坑矿田钻孔中打鼓顶组火山岩年龄集中于 $157 \sim 162$ Ma, 鹅湖岭组含角砾熔结凝灰岩年龄为 146.6 Ma。孟祥金等^[11]获得含矿打鼓顶组和鹅湖岭组火山岩锆石SHRIMP年龄约为 158 Ma。而苏慧敏等^[20]获得天华山盆地地表出露打鼓顶组和鹅湖岭组火山岩年龄分别为 $142 \sim 144$ Ma 和 $137 \sim 140$ Ma。考虑到不同研究者所测样品的空间关系,我们认为打鼓顶组及鹅湖岭组火山岩可能具有多期喷发的特征。冷水坑矿区内打鼓顶组主体年龄应该在 161 Ma 左右,这与 Jiang 等^[31]以及杨水源等^[23]报道的江西相山地区打鼓顶组年龄(158 Ma)基本一致,表明该区存在晚侏罗世火山岩。然而在冷水坑邻区已报道梨子坑、仙霞岭、黄岗山等火山盆地内打鼓顶组、鹅湖岭组层型剖面火山岩的成岩年龄均为 $132 \sim 144$ Ma^[32-33]。因此认为冷水坑含矿打鼓顶组和鹅湖岭组与矿区地表出露的火山岩($137 \sim 144$ Ma)为不同期次的火山岩浆活动的产物,而地表出露的火山岩与邻区打鼓顶组、鹅湖岭组层型剖面火山岩为同一火山活动旋

表1 江西冷水坑岩浆岩 LA-CP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of magmatic rocks in Lengshuikeng

分析点号	含量(μg/g)			Th	U	同位素比值						年龄(Ma)				
	Pb	Th	U			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
11LS-1-01	12.9	326	280	1.16	0.04855	0.00155	0.16724	0.00549	0.02528	0.00043	0.00765	0.00014	128 ± 71	157 ± 5	161 ± 3	154 ± 3
11LS-1-02	7.75	164	177	0.93	0.04941	0.00182	0.17162	0.00671	0.02520	0.00044	0.00759	0.00014	169 ± 85	161 ± 6	160 ± 3	153 ± 3
11LS-1-03	14.0	220	269	0.82	0.06475	0.00229	0.29135	0.01056	0.03283	0.00062	0.01077	0.00026	766 ± 69	260 ± 8	208 ± 4	216 ± 5
11LS-1-04	13.7	290	341	0.85	0.04888	0.00135	0.17016	0.00488	0.02540	0.00041	0.00787	0.00013	143 ± 65	160 ± 4	162 ± 3	159 ± 3
11LS-1-05	10.43	268	220	1.22	0.05934	0.00170	0.20630	0.00623	0.02537	0.00048	0.00815	0.00013	589 ± 61	190 ± 5	161 ± 3	164 ± 3
11LS-1-06	5.09	131	90.7	1.44	0.05185	0.00482	0.17916	0.01683	0.02490	0.00072	0.00814	0.00051	280 ± 215	167 ± 14	159 ± 5	164 ± 10
11LS-1-07	6.14	132	140	0.95	0.05061	0.00366	0.17103	0.01101	0.02568	0.00068	0.00850	0.00030	233 ± 164	160 ± 10	163 ± 4	171 ± 6
11LS-1-08	5.21	137.9	79.4	1.74	0.05187	0.00358	0.17956	0.01148	0.02572	0.00052	0.00857	0.00054	280 ± 155	168 ± 10	164 ± 3	173 ± 11
11LS-1-09	4.02	93.4	68.2	1.37	0.05773	0.00464	0.19843	0.01510	0.02566	0.00061	0.00832	0.00024	520 ± 178	184 ± 13	163 ± 4	167 ± 5
11LS-1-10	6.19	150	113	1.33	0.05103	0.00268	0.17440	0.00899	0.02504	0.00039	0.00806	0.00044	243 ± 125	163 ± 8	159 ± 2	162 ± 9
11LS-1-11	9.62	209	223	0.94	0.05146	0.00181	0.17638	0.00654	0.02492	0.00035	0.00799	0.00019	261 ± 75	165 ± 6	159 ± 2	161 ± 4
11LS-1-12	7.86	214	123	1.75	0.07497	0.00504	0.25551	0.01717	0.02511	0.00067	0.00823	0.00020	1133 ± 135	231 ± 14	160 ± 4	166 ± 4
11LS-1-13	10.62	188	207	0.91	0.09071	0.00452	0.31172	0.01809	0.02522	0.00047	0.01141	0.00042	1440 ± 95	276 ± 14	161 ± 3	229 ± 8
11LS-1-14	4.98	110	85.5	1.28	0.05009	0.00451	0.17411	0.01524	0.02531	0.00087	0.00824	0.00029	198 ± 196	163 ± 13	161 ± 5	166 ± 6
11LS-1-15	4.30	109	80.5	1.35	0.05344	0.00256	0.18857	0.00938	0.02544	0.00040	0.00805	0.00018	346 ± 109	175 ± 8	162 ± 3	162 ± 4
11LS-1-16	6.53	150	120	1.25	0.05122	0.00295	0.17863	0.01017	0.02548	0.00051	0.00841	0.00019	250 ± 133	167 ± 9	162 ± 3	169 ± 4
11LS-1-17	5.14	145	92.4	1.57	0.05035	0.00291	0.17153	0.00920	0.02546	0.00055	0.00780	0.00022	209 ± 131	161 ± 8	162 ± 3	157 ± 4
11LS-1-18	4.22	112	71.3	1.57	0.06394	0.00386	0.22299	0.01375	0.02534	0.00047	0.00805	0.00024	739 ± 129	204 ± 11	161 ± 3	162 ± 5
11LS-1-19	7.75	162	173	0.93	0.05387	0.00338	0.19079	0.01283	0.02560	0.00047	0.00829	0.00018	365 ± 143	177 ± 11	163 ± 3	167 ± 4
11LS-1-20	5.52	115	98.7	1.16	0.05048	0.00309	0.17525	0.01026	0.02545	0.00046	0.01024	0.00141	217 ± 138	164 ± 9	162 ± 3	206 ± 28
11LS-1-21	5.82	153	105.1	1.46	0.05041	0.00245	0.17549	0.00882	0.02566	0.00049	0.00827	0.00029	213 ± 113	164 ± 8	163 ± 3	166 ± 6
11LS-1-22	6.12	149	123	1.21	0.05515	0.00255	0.19029	0.00867	0.02528	0.00038	0.00794	0.00017	417 ± 97	177 ± 7	161 ±	160 ± 3
11LS-3-01	5.88	123	141	0.88	0.0496	0.0017	0.1757	0.0062	0.02609	0.00067	0.0079	0.0002	172 ± 77	164 ± 5	166 ± 4	159 ± 5
11LS-3-02	7.06	231	118	1.96	0.0497	0.0021	0.1729	0.0070	0.02554	0.00036	0.0075	0.0001	183 ± 100	162 ± 6	163 ± 2	152 ± 3
11LS-3-03	17.0	368	417	0.88	0.0513	0.0014	0.1799	0.0051	0.02553	0.00030	0.0080	0.0003	257 ± 65	168 ± 4	163 ± 2	162 ± 6
11LS-3-04	27.3	970	368	2.64	0.0493	0.0016	0.1710	0.0056	0.02518	0.00035	0.0081	0.0001	165 ± 74	160 ± 5	160 ± 2	162 ± 2
11LS-3-05	3.74	86.8	58.9	1.47	0.0605	0.0043	0.2345	0.0148	0.02863	0.00045	0.0095	0.0002	620 ± 156	214 ± 12	182 ± 3	190 ± 5
11LS-3-06	3.55	69.5	81.8	0.85	0.0517	0.0027	0.1750	0.0087	0.02520	0.00059	0.0083	0.0004	272 ± 119	164 ± 8	160 ± 4	167 ± 9
11LS-3-07	9.9	319	175	1.83	0.0499	0.0031	0.1714	0.0097	0.02532	0.00041	0.0076	0.0001	191 ± 143	161 ± 8	161 ± 3	153 ± 3
11LS-3-08	17.7	699	212	3.30	0.0534	0.0026	0.1789	0.0085	0.02441	0.00035	0.0075	0.0001	346 ± 109	167 ± 7	155 ± 2	151 ± 2
11LS-3-09	5.34	151	95.7	1.58	0.0519	0.0032	0.1745	0.0082	0.02537	0.00036	0.0081	0.0002	280 ± 106	163 ± 7	161 ± 2	163 ± 3
11LS-3-11	4.95	125	93.7	1.34	0.0842	0.0046	0.4704	0.0334	0.03826	0.00055	0.0141	0.0006	1298 ± 106	391 ± 23	242 ± 3	284 ± 13
11LS-3-12	34.7	951	791	1.20	0.0539	0.0028	0.1798	0.0088	0.02503	0.00036	0.0084	0.0002	365 ± 117	168 ± 8	159 ± 2	169 ± 4
11LS-3-13	9.6	307	171	1.80	0.0920	0.0049	0.3062	0.0122	0.02588	0.00051	0.0074	0.0001	1533 ± 101	271 ± 9	165 ± 3	148 ± 2
11LS-3-14	4.91	146	86.8	1.68	0.0492	0.0017	0.1680	0.0057	0.02504	0.00027	0.0075	0.0001	167 ± 80	158 ± 5	159 ± 2	151 ± 2
11LS-3-15	14.5	397	333	1.19	0.0501	0.0021	0.1711	0.0073	0.02502	0.00034	0.0079	0.0001	198 ± 100	160 ± 6	159 ± 2	159 ± 3
11LS-3-16	3.49	85.6	72.6	1.18	0.0502	0.0021	0.1725	0.0065	0.02532	0.00037	0.0079	0.0001	206 ± 98	162 ± 6	161 ± 2	158 ± 3
11LS-3-17	8.13	266	141	1.89	0.0569	0.0034	0.1961	0.0114	0.02539	0.00052	0.0079	0.0002	487 ± 130	182 ± 10	162 ± 3	160 ± 4
11LS-3-18	3.20	72.2	70.0	1.03	0.0570	0.0028	0.1957	0.0093	0.02532	0.00040	0.0076	0.0001	500 ± 103	181 ± 8	161 ± 3	152 ± 2
11LS-3-19	3.76	87.0	71.4	1.22	0.0497	0.0024	0.1729	0.0082	0.02533	0.00035	0.0079	0.0002	189 ± 118	162 ± 7	161 ± 2	159 ± 3
11LS-3-20	6.84	195	116	1.69	0.0530	0.0030	0.1813	0.0098	0.02518	0.00039	0.0087	0.0003	328 ± 130	169 ± 8	160 ± 2	175 ± 7
11LS-3-21	8.53	214	177	1.20	0.0519	0.0022	0.1819	0.0080	0.02551	0.00036	0.0084	0.0001	283 ± 100	170 ± 7	162 ± 2	169 ± 3
11LS-3-22	4.65	141	84.3	1.67	0.0511	0.0026	0.1733	0.0085	0.02521	0.00046	0.0076	0.0002	243 ± 123	162 ± 7	160 ± 3	154 ± 4
11LS-3-23	8.03	216	179	1.20	0.0539	0.0027	0.1854	0.0096	0.02523	0.00062	0.0074	0.0001	369 ± 110	173 ± 8	161 ± 4	148 ± 3
11LS-3-24	6.61	213	106	2.02	0.0515	0.0022	0.1816	0.0082	0.02545	0.00041	0.0079	0.0002	261 ± 94	169 ± 7	162 ± 3	160 ± 3
11LS-3-25	8.08	244	145	1.69	0.0479	0.0022	0.1628	0.0072	0.02502	0.00038	0.0078	0.0002	100 ± 98	153 ± 6	159 ± 2	157 ± 3
11LS-3-26	4.13	108	80.7	1.34	0.0494	0.0043	0.1726	0.0167	0.02545	0.00093	0.0078	0.0002	165 ± 202	162 ± 14	162 ± 6	158 ± 5
11LS-3-27	3.78	93.4	75.5	1.24	0.0570	0.0038	0.1935	0.0125	0.02530	0.00076	0.0078	0.0002	500 ± 146	180 ± 11	161 ± 5	157 ± 4
11LS-3-28	13.0	292	319	0.91	0.0510	0.0014	0.1775	0.0049	0.02541	0.00036	0.0080	0.0001	243 ± 56	166 ± 4	162 ± 2	162 ± 3
11LS-3-29	51.2	2052	532	3.85	0.0526	0.0018	0.1808	0.0070	0.02495	0.00043	0.0080	0.0001	309 ± 78	169 ± 6	159 ± 3	161 ± 2
11LS-3-30	5.01	139	100	1.38	0.0506	0.0031	0.1726	0.0089	0.02535	0.00064	0.0075	0.0002	233 ± 145	162 ± 8	161 ± 4	151 ± 5
11ZK13001-01	52.3	881	1089	0.81	0.0754	0.0023	0.2874	0.0086	0.0278	0.0003	0.0099	0.0007	1080 ± 61	257 ± 7	177 ± 2	199 ± 14

(续表1)

分析点号	含量(μg/g)			Th U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$
11ZK13001-02	12.7	390	187	2.09	0.0658	0.0031	0.2379	0.0114	0.0262	0.0003	0.0088	0.0003	1200 ± 100	217 ± 9	167 ± 2	178 ± 5
11ZK13001-03	31.1	580	868	0.67	0.0493	0.0010	0.1805	0.0037	0.0265	0.0002	0.0079	0.0001	161 ± 44	168 ± 3	169 ± 1	160 ± 2
11ZK13001-04	56.2	1029	1551	0.66	0.0496	0.0007	0.1808	0.0027	0.0264	0.0002	0.0084	0.0002	176 ± 33	169 ± 2	168 ± 1	170 ± 4
11ZK13001-05	41.4	705	1159	0.61	0.0508	0.0009	0.1866	0.0033	0.0266	0.0002	0.0086	0.0001	228 ± 71	174 ± 3	169 ± 1	174 ± 2
11ZK13001-06	52.3	848	1484	0.57	0.0510	0.0008	0.1858	0.0029	0.0265	0.0003	0.0087	0.0001	243 ± 35	173 ± 3	168 ± 2	176 ± 2
11ZK13001-07	29.2	428	904	0.47	0.0508	0.0010	0.1855	0.0037	0.0265	0.0003	0.0081	0.0001	232 ± 44	173 ± 3	169 ± 2	163 ± 2
11ZK13001-08	35.5	659	978	0.67	0.0495	0.0010	0.1789	0.0041	0.0263	0.0005	0.0081	0.0001	172 ± 50	167 ± 3	168 ± 3	164 ± 3
11ZK13001-09	33.3	827	649	1.27	0.0652	0.0018	0.2386	0.0069	0.0265	0.0002	0.0100	0.0003	789 ± 56	217 ± 6	168 ± 2	201 ± 6
11ZK13001-10	26.3	497	706	0.70	0.0499	0.0011	0.1812	0.0041	0.0264	0.0002	0.0082	0.0001	187 ± 19	169 ± 4	168 ± 1	165 ± 2
11ZK13001-11	24.7	473	658	0.72	0.0688	0.0025	0.2351	0.0082	0.0250	0.0002	0.0084	0.0001	894 ± 75	214 ± 7	159 ± 1	169 ± 3
11ZK13001-12	59.6	774	1794	0.43	0.0538	0.0008	0.1961	0.0030	0.0264	0.0002	0.0091	0.0001	361 ± 33	182 ± 3	168 ± 1	184 ± 2
11ZK13001-13	17.2	463	336	1.38	0.0536	0.0018	0.1942	0.0068	0.0265	0.0004	0.0085	0.0001	354 ± 78	180 ± 6	168 ± 3	172 ± 3
11ZK13001-14	33.7	594	950	0.62	0.0491	0.0009	0.1793	0.0034	0.0264	0.0002	0.0078	0.0001	154 ± 44	167 ± 3	168 ± 1	158 ± 2
11ZK13001-15	14.7	285	271	1.05	0.0835	0.0058	0.3285	0.0308	0.0264	0.0003	0.0108	0.0005	1281 ± 135	288 ± 24	168 ± 2	217 ± 10
11ZK13001-16	20.4	410	395	1.04	0.1079	0.0061	0.4094	0.0318	0.0258	0.0004	0.0109	0.0005	1765 ± 104	348 ± 23	164 ± 2	218 ± 10
11ZK13001-17	12.5	361	219	1.65	0.0497	0.0022	0.1805	0.0078	0.0265	0.0003	0.0086	0.0002	189 ± 104	168 ± 7	168 ± 2	173 ± 3
11ZK13001-18	30.2	664	724	0.92	0.0480	0.0018	0.1749	0.0060	0.0265	0.0003	0.0082	0.0001	98 ± 90	164 ± 5	168 ± 2	166 ± 3

表2 冷水坑及郊区火山岩含矿花岗斑岩同位素年龄

Table 2 Isotopic data of volcanic rocks in Lengshuikeng and its adjacent area

地层	采样地点	岩石名称	测试方法	年龄值(Ma)	参考文献
鹅湖岭组三段	天华山盆地	流纹质熔结凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	140 ± 1	苏慧敏等,2013 ^[20]
鹅湖岭组一段	天华山盆地	沉凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	137 ± 1	苏慧敏等,2013 ^[20]
鹅湖岭组上部	天华山盆地	晶屑凝灰岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	157.8 ± 1.6	孟祥金等,2012 ^[11]
鹅湖岭组上部	天华山盆地	晶屑凝灰岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	157.2 ± 1.5	孟祥金等,2012 ^[11]
鹅湖岭组	天华山盆地	含角砾熔结凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	$146.6 \sim 159$	邱骏挺等,2013 ^[16]
打鼓顶组	天华山盆地	底板晶屑凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	161.3 ± 1.3	本文
打鼓顶组	天华山盆地	顶板晶屑凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	160.58 ± 0.98	本文
打鼓顶组	天华山盆地	晶屑凝灰岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	158.2 ± 1.8	孟祥金等,2012 ^[11]
打鼓顶组	天华山盆地	含角砾熔结凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	160.8 ± 1.9	邱骏挺等,2013 ^[16]
打鼓顶组	天华山盆地	含角砾熔结凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	155.1 ± 1.2	骆学全等,2013 ^[18]
打鼓顶组	天华山盆地	含角砾熔结凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	161.8 ± 1.4	徐贻赣等,2013 ^[3]
打鼓顶组上段	天华山盆地	上段安山岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	142 ± 1	苏慧敏等,2013 ^[20]
打鼓顶组下段	天华山盆地	晶屑凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	144 ± 1	苏慧敏等,2013 ^[20]
矿床时代	天华山盆地	蚀变矿物绢云母	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法	162.8 ± 1.6	孟祥金等,2009 ^[10]
	天华山盆地	闪锌矿	全岩 Rb-Sr 等时线	126.9 ± 7.1	徐贻赣等,2013 ^[3]
侵入岩	天华山盆地	含矿花岗斑岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	157.6 ± 1.3	孟祥金等,2012 ^[11]
	天华山盆地	含矿花岗斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	150.3 ± 1.6	骆学全等,2013 ^[18]
	天华山盆地	含矿花岗斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	168.09 ± 0.98	本文
	天华山盆地	含矿花岗斑岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	162 ± 2	左力艳等,2010 ^[8]
	天华山盆地	含矿花岗斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	$154.3 \sim 163.6$	邱骏挺等,2013 ^[16]
	天华山盆地	含矿花岗斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	155	王长明等,2011 ^[12]
	天华山盆地	含矿花岗斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	158 ± 1	苏慧敏等,2013 ^[20]
	天华山盆地	含矿花岗斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	157 ± 1	苏慧敏等,2013 ^[20]
	天华山盆地	石英正长斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	144 ± 1	苏慧敏等,2013 ^[20]
	天华山盆地	碱长花岗斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	140 ± 1	苏慧敏等,2013 ^[20]
	天华山盆地	流纹斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	140 ± 1	苏慧敏等,2013 ^[20]
	天华山盆地	花岗斑岩	全岩 Rb-Sr 法	159	孟祥金等,2007 ^[9]
	天华山盆地	流纹斑岩	全岩 Rb-Sr 法	129.5	孟祥金等,2007 ^[9]
	天华山盆地	碱长花岗斑岩	全岩 Rb-Sr 法	128.4	孟祥金等,2007 ^[9]
	天华山盆地	石英正长斑岩	K-Ar 法	121	孟祥金等,2007 ^[9]
打鼓顶组	天华山盆地	花岗斑岩	全岩 Rb-Sr 等时线	131 ± 5.1	徐文忻等,2001 ^[4]
打鼓顶组	天华山盆地	火山岩	全岩 Rb-Sr 等时线	101.3 ± 4.1	徐文忻等,2001 ^[4]
打鼓顶组	黄岗山盆地	钾质粗面斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	138 ± 1	罗平等,2009 ^[32]
鹅湖岭组三段	仙霞岭盆地	流纹质熔结凝灰岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	138.0 ± 2.4	张家菁等,2009 ^[33]

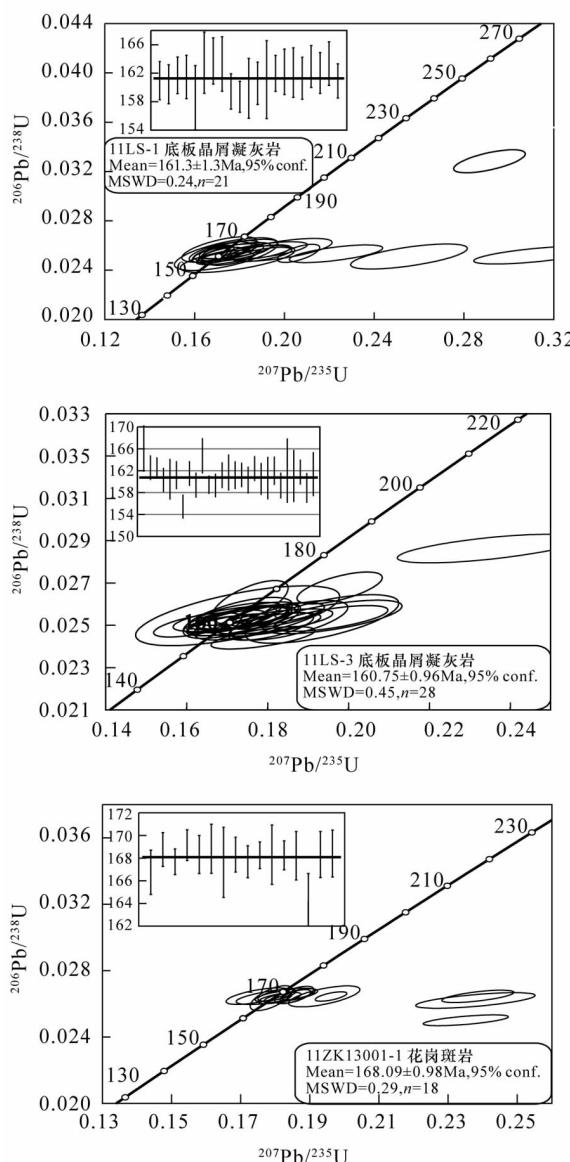


图3 冷水坑岩浆岩锆石U-Pb年龄谐和图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagrams of magmatic rocks in Lengshuikeng

回的产物,冷水坑含矿火山岩归入打鼓顶组和鹅湖岭组是否合适还需要进一步研究。

4.2 冷水坑矿田成矿作用期次划分

本文在对冷水坑矿田以往定年数据的仔细区分及甄别基础上,结合本次研究成果,对冷水坑岩浆活动的期次与成矿关系作简要总结,初步划分了矿区内地质事件的期次与成矿作用的关系。

(1) 第一期:以侵入岩浆活动为主,其时间约为164~170 Ma。本次研究获得冷水坑矿田内花岗斑岩的年龄为168 Ma,而邱骏挺等^[16]测得冷水坑矿田花岗斑岩年龄为163.6 Ma,另外在冷水坑矿田相邻月子坑盆地也发现174 Ma火山岩年龄(余明刚

等,未发表数据),这表明在冷水坑矿田存在170 Ma左右的岩浆事件,但还需要进一步证实。

(2) 第二期:火山-侵入岩浆活动发生于147~162 Ma,是矿区内地质事件的高峰期。矿区内地质事件打鼓顶组火山岩形成年龄为161 Ma左右^[3,11,16~19],本文也测得打鼓顶组火山岩的形成时代为161 Ma,而鹅湖岭组火山岩最初活动时间为159 Ma,而主体形成于147 Ma,其火山岩的时代也代表了火山沉积-热液改造型矿体成矿主要时代;而含矿花岗斑岩的年龄为150~163 Ma^[8~12,16~18],含矿花岗斑岩中绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄代表的成矿年龄为163 Ma,与含矿斑岩活动时间是一致。在该期间内,火山岩和花岗斑岩的形成时代与成矿时代基本一致。

(3) 第三期:火山-侵入岩浆活动发生于137~144 Ma,火山岩和侵入岩都有,但相比第二期岩浆岩分布范围明显减少,发育大量次火山岩,代表了该区内火山活动的结束。苏慧敏等^[20]测得天华山盆地地表出露鹅湖岭组火山岩年龄为137~140 Ma,次火山岩相的石英正长斑岩、碱长花岗斑岩和流纹斑岩年龄分别为144、140、140 Ma。本期年龄与天华山盆地相邻盆地与成矿密切相关的火山-次火山岩的成岩年龄135~144 Ma一致^[32~33],但冷水坑矿田内该期岩浆活动目前还没有发现成矿。另外,徐贻赣等^[3]获得闪锌矿Rb-Sr同位素测成矿年龄为126.9 Ma,可能存在更晚一期的热液活动。

此外,冷水坑矿田存有多期全岩Rb-Sr、K-Ar年龄。例如,孟祥金等^[9]测得本区4种侵入岩全岩Rb-Sr法年龄为:花岗斑岩(159 Ma),流纹斑岩(130 Ma),碱长花岗斑岩(128 Ma),石英正长斑岩(121 Ma)。徐文忻等^[4]获得冷水坑矿田火山岩和花岗斑岩Rb-Sr、K-Ar年龄值(83~138 Ma),这可能代表多期流体热事件年龄,而不是岩浆结晶年龄。由于不同同位素体系的封闭温度存在明显差异,对同一地质体采用不同的测年方法,所得到的结果往往存在一定的差异,已有的大量研究均显示全岩Rb-Sr、K-Ar、Ar-Ar法所获得的年龄明显比锆石U-Pb年龄年轻^[34~35],Rb-Sr、K-Ar体系的封闭体系极容易受后期热事件扰动的影响,其年龄可能代表不了岩石的结晶年龄,更可能代表后期热事件或流体作用的年龄^[4,9]。同样在本区内,对同一岩体,苏慧敏等^[20]测得的锆石U-Pb年龄明显老于孟祥金等^[10]全岩Rb-Sr等时线年龄也说明了这一问题。综上所述,冷水坑矿田应该存在多期流体活动,流体活动时间在121~159 Ma之间,但冷水坑是否还存在更晚一期的流体成矿事件还需要进一步厘定。

5 华南晚侏罗世火山岩厘定及其地质意义

5.1 区域晚侏罗世火山岩

华南大面积出露晚中生代火山-沉积地层,划分为上、下火山岩系,其中下火山岩系出露最广,与上火山岩系之间普遍存在区域性不整合。下火山岩系呈面状分布,包括浙西建德群、浙东磨石山群、福建南园组和小溪组、江西武夷群、鸡笼嶂组;上火山岩系出露面积有限,主要局限于火山-构造盆地中,其火山机构往往保存较好,主要有浙西衢江群、浙东永康群和天台群、福建石帽山群^[36-41]。对于上火山岩系的形成时代,大量的研究均得到了较一致的结果,其形成年龄大致在 85~110 Ma,属白垩纪喷发产物^[36-41]。而不同于上火山岩系,下火山岩系的时代历来有争议,争议的焦点在于它们属晚侏罗世还是早白垩世。本文采用国际地层委员会 2004 年提出的晚侏罗世时代时限(145.5~161.2 Ma)讨论此问题。

近年来随着高精度锆石 U-Pb 测年数据的积累,华南很多原属于晚侏罗世的火山岩被划归到了早白垩世。例如,浙东地区下火山岩系火山活动时限为 120~140 Ma^[41];浙西地区寿昌盆地建德群形成时限为 115~134 Ma^[42];相山盆地、大桥坞盆地、石溪盆地鹅湖岭组火山岩年龄为 132~138 Ma^[21-24];峡江-广丰、三南-寻乌火山岩带的版石、蔡坊、三百山、长沙、石溪盆地鸡笼嶂组形成时代为 130~142 Ma^[43];浙闽交界高坞组年龄为 133.2~136 Ma,西山头组年龄为 128~132 Ma,福建南园组形成于 140~143 Ma,小溪组形成于 126 Ma^[44];福建仙游园庄剖面南园组第一段年龄 143 Ma、泉州德化赤水剖面南园组底部粗面岩年龄为 142.1 Ma^[45]。综上所述,以往认为的下火山岩系的火山岩形成时代多为早白垩世。

但近年来随着地质工作的深入,又新发现了一些晚侏罗世的火山岩信息。例如,邢光福等^[39]、Li 等^[46]报道了福安市社口剖面下部的安山岩年龄为 162 Ma,上部流纹质晶屑熔结凝灰岩年龄为 150 Ma,这是迄今为止闽浙沿海发现的最可靠的上侏罗统火山地层,时代明显早于福建其他南园组剖面火山岩,与大范围展布的南园组火山岩属不同火山活动旋回的产物。李祥辉等^[42]发现了浙西地区寿昌盆地存在时代为 151 Ma 凝灰熔岩,浙东南巍山镇获得大爽组火山岩时代为 155 Ma(陈荣,未发表),Jiang 等^[31]报道的相山地区打鼓顶组火山岩时代为 158 Ma,本文报道的冷水坑矿田打鼓顶组含矿火山岩主体年龄为 160 Ma。上述这些研究成果均表明,华南地区确实存在晚侏罗世的火山活动,以往发现较少的原因可能是由

于晚期火山岩覆盖,地表出露较少所致。

5.2 地质意义

华南早侏罗世岩石的成因已经有多种构造模式被提出,分歧在于是印支造山运动后的后造山伸展^[47]或是古太平洋板块俯冲诱发的板内构造环境^[48],还是先存的俯冲板片折断并拆沉产生的软流圈上涌和岩石圈伸展^[49-50],但不论哪种观点,均认可其形成于伸展的构造背景。已有研究表明,华南中侏罗世晚期-晚侏罗世处于挤压隆升状态,伴有变质变形和推覆构造等^[51-52],华南下火山岩系与下伏中侏罗统或更早的地层之间呈明显角度不整合接触。因此,中-晚侏罗世-早白垩世为华南构造体制转换的关键时期,邢光福等^[39]、Li 等^[46]认为闽东福安市社口和仙游县圆庄火山岩形成于不同的火山活动旋回和构造背景,两者时代之差(142.3~149.8 Ma)即为华南晚中生代构造体制最终结束的时限,从此华南进入太平洋构造域体制。因此,华南冷水坑等地晚侏罗世火山岩的发现,为华南晚中生代构造体制大转换的精细研究提供了重要地质依据,冷水坑矿区晚侏罗-早白垩世多阶段的岩浆活动,可能与区域的构造体制转变有密切联系,对其岩石成因及构造意义值得进一步研究。

6 结语

(1) 本次研究对冷水坑银铅锌矿床下鲍矿段打鼓顶组顶、底板晶屑凝灰岩及含矿花岗斑岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,测年结果表明打鼓顶组底板、顶板晶屑凝灰岩形成时代分别为 161.3 ± 1.3 Ma、160.75 ± 0.96 Ma,含矿花岗斑岩形成时代为 168.09 ± 0.80 Ma,含矿花岗岩斑岩 168.09 ± 0.80 Ma 的年龄表明冷水坑矿田存在中侏罗世岩浆活动。

(2) 冷水坑矿田存在 3 期火山-侵入岩浆活动:第Ⅰ期火山-侵入岩浆活动形成于 164~170 Ma;第Ⅱ期火山-侵入岩浆活动发生于 157~161 Ma,为火山沉积-热液改造型矿床和斑岩型矿体的主要成矿时代,岩浆活动和成矿时代基本一致;第Ⅲ期火山-侵入岩浆活动时限为 140~146 Ma。另外,冷水坑存在更晚一期(126.9 Ma)成矿年龄,表明可能存在更晚一期的热液活动,但没有发现相关的岩浆活动。

(3) 中-晚侏罗世-早白垩世为华南构造体制转换的关键时期,而华南冷水坑等地晚侏罗世火山岩的准确厘定为华南晚中生代构造体制大转换的精细研究提供了重要地质依据。

此研究工作仍然存在以下问题需要进一步研究:①在相邻月子坑盆地也发现174 Ma火山岩年龄,但冷水坑矿田是否存在早-中侏罗世火山岩及其与成矿作用的关系有待证实;②第Ⅲ期火山-侵入岩浆活动与成矿作用关系不清,需要进一步研究。

7 参考文献

- [1] 黄振强.冷水坑银矿田成矿条件及成矿特征[J].贵金属地质,1993,2(4):284-291.
Huang Z Q. The Mineralization Conditions and Deposit Characteristics of Lengshuikeng Silver Orefield in Jiangxi, China[J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1993, 2(4):284-291.
- [2] 罗泽雄,万浩章,何细荣.江西冷水坑矿田银铅锌矿床特征及成矿模式探讨[J].沉积与特提斯地质,2012,32(4):94-99.
Luo Z S, Wan H Z, He X R. Metallogenetic Model for the Silver-Lead-Zinc Deposits in the Lengshuikeng Ore Field, Jiangxi [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(4):94-99.
- [3] 徐贻赣,吴淦国,王长明,等.江西冷水坑银铅锌矿田闪锌矿铷-锶测年及地质意义[J].地质学报,2013,87(5):621-633.
Xu Y G, Wu G G, Wang C M, et al. Rb-Sr Dating of Sphalerites from the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn Deposit, Jiangxi, and Its Geological Significances [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(5):621-633.
- [4] 徐文忻,肖孟华,陈民扬.江西冷水坑银铅锌矿床同位素地球化学研究[J].矿物岩石地球化学通报,2001,20(4):370-372.
Xu W X, Xiao M H, Chen M Y. A Study of the Isotope Geochemistry of the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn Ore Deposit, Jiangxi Province [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, 20(4):370-372.
- [5] 肖茂章,狄永军,明小泉,等.冷水坑矿田层状富铅锌矿赋矿围岩-铁锰碳酸岩角砾岩物质来源及成因分析[J].中国地质,2014,41(2):589-601.
Xiao M Z, Di Y J, Ming X Q, et al. Material Sources and Genetic Analysis of the Iron-Manganese Carbonatite Breccia Host Rock of the Stratiform Pb-Zn-rich Orebodies in the Lengshuikeng Orefield [J]. Geology in China, 2014, 41(2):589-601.
- [6] 左力艳,孟祥金,杨竹森.冷水坑斑岩型银铅锌矿床含矿岩系岩石地球化学及Sr、Nd同位素研究[J].矿床地质,2008,27(3):367-382.
Zuo L Y, Meng X J, Yang Z S. Petrochemistry and Sr, Nd Isotopes of Intrusive in Lengshuikeng Porphyry Type Ag-Pb-Zn Deposit [J]. Mineral Deposits, 2008, 27 (3): 367-382.
- [7] 左力艳,侯增谦,宋玉财,等.冷水坑斑岩型银铅锌矿床成矿流体特征研究[J].地球学报,2009,30(5):616-626.
Zuo L Y, Hou Z Q, Song Y C, et al. A Study of the Ore-forming Fluid in the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn Porphyry Deposit [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2009, 30 (5): 616-626.
- [8] 左力艳,侯增谦,孟祥金,等.冷水坑斑岩型银铅锌矿床含矿岩体锆石SHRIMP U-Pb年代学研究[J].中国地质,2010,37(5):1450-1456.
Zuo L Y, Hou Z Q, Meng X J, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Ore-bearing Rock in the Lengshuikeng Porphyry Type Ag-Pb-Zn Deposit [J]. Geology in China, 2010,37(5):1450-1456.
- [9] 孟祥金,董光裕,刘建光.江西冷水坑斑岩型铅锌银矿床[M].北京:地质出版社,2007:1-148.
Meng X J, Dong G Y, Liu J G. Jiangxi Lengshuikeng Porphyry Type Lead-Zinc-Silver Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:1-148.
- [10] 孟祥金,侯增谦,董光裕,等.江西冷水坑斑岩型铅锌银矿床地质特征、热液蚀变与成矿时限[J].地质学报,2009,83(12):1951-1967.
Meng X J, Hou Z Q, Dong G Y, et al. Geological Characteristics and Mineralization Timing of the Lengshuikeng Porphyry Pb-Zn-Ag Deposit, Jiangxi Province [M]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83 (12): 1951-1967.
- [11] 孟祥金,徐文艺,杨竹森,等.江西冷水坑矿田火山-岩浆活动时限:SHRIMP锆石U-Pb年龄证据[J].矿床地质,2012,31(4):831-838.
Meng X J, Xu W Y, Yang Z S, et al. Time Limit of Volcanic-Magmatic Action in Lengshuikeng Orefield, Jiangxi: Evidence from SHRIMP Zircon U-Pb Ages [J]. Mineral Deposits, 2012,31(4):831-838.
- [12] 王长明,徐贻赣,吴淦国,等.江西冷水坑Ag-Pb-Zn矿田碳、氧、硫、铅同位素特征及成矿物质来源[J].地学前缘,2011,18(1):179-192.
Wang C M, Xu Y G, Wu G G, et al. C, O, S and Pb Isotopes Characteristics and Sources of the Ore Metals of the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn Ore Field, Jiangxi [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(1):179-192.
- [13] 黄水保,毛大华,狄永军,等.北武夷梨子坑火山盆地流纹斑岩与铅锌矿的成因关系.资源调查与环境,2012,33(3):152-157.
Huang S B, Mao D H, Di Y J, et al. Genetic Relationship between Rhyolite Porphyries and Lead-Zinc Mineralization in Lizikeng Volcanic Basin, Northern Wuyishan [J]. Resources Survey & Environment, 2012, 33 (3): 152-157.
- [14] 黄水保,孟祥金,徐文艺,等.冷水坑矿田层状铅锌银矿稳定同位素特征与矿床成因[J].东华理工大学学

- 报(自然科学版),2012,35(2):101-110.
- Huang S B, Meng X J, Xu W Y, et al. Characteristics of Stable Isotope of the Bedded Lead-Zinc-Silver Orebody in Lengshuikeng Orefield and Ore Genesis[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition), 2012, 35(2):101-110.
- [15] 卢燃,毛景文,高建京,等.江西冷水坑矿田下鲍 Ag-Pb-Zn 矿床地质特征及银的赋存状态研究[J].岩石学报,2012,28(1):105-121.
- Lu R, Mao J W, Gao J J, et al. Geological Characteristics and Occurrence of Silver in Xiabao Ag-Pb-Zn Deposit, Lengshuikeng Ore Field, Jiangxi Province, East China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1):105-121.
- [16] 邱骏挺,余心起,吴淦国,等.江西冷水坑矿区构造-岩浆活动的年代学约束[J].岩石学报,2013,29(3):812-826.
- Qiu J T, Yu X Q, Wu G G, et al. Geochronology of Igneous Rocks and Nappe Structures in Lengshuikeng Deposit, Jiangxi Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3):812-826.
- [17] 狄永军,徐贻赣,吴淦国,等.江西冷水坑银铅锌矿田推覆构造的形成时代:来自年代学的约束[J].地学前缘,2013,20(4):340-349.
- Di Y J, Xu Y G, Wu G G, et al. The Formation Era of Nappe Structure in Lengshuikeng Ag-Pb-Zn Ore Field, Jiangxi: Constraints from Geochronology [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4):340-349.
- [18] 骆学全,张雪辉,徐贻赣,等.江西冷水坑银铅锌矿床层状矿体的成矿模式及深部勘查方向[J].地质与勘探,2013,49(6):1-10.
- Luo X Q, Zhang X H, Xu Y G, et al. A Metallogenic Model for Bedded Orebodies in the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn Deposit, Jiangxi and Deep Exploration Direction[J]. Geology and Exploration, 2013, 49(6):1-10.
- [19] 孙建东,骆学全,张雪辉,等.江西省冷水坑银铅锌矿床铁锰碳酸盐角砾岩成因研究[J].中国地质,2014,41(2):484-496.
- Sun J D, Luo X Q, Zhang X H, et al. A Genetic Study of Fe-Mn Carbonate Breccias in the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn Deposit, Jiangxi Province[J]. Geology in China, 2014, 41(2):484-496.
- [20] 苏慧敏,毛景文,何细荣,等.北武夷天华山盆地形成时限的约束:来自火山岩-侵入岩的年代学证据[J].中国科学(地球科学),2013,43(5):745-759.
- Su H M, Mao J W, He X R, et al. Timing of the Formation of the Tianhuashan Basin in Northern Wuyi as Constrained by Geochronology of Volcanic and Plutonic Rocks[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(5): 745-759.
- [21] 何观生,戴民主,李建峰,等.相山流纹英安斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J].大地构造与成矿学,2009,33(2):299-303.
- He G S, Dai M Z, Li J F, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Its Geological Implication for the Xiangshan Porphyric Dacite-Rhyolitic [J]. Geotectonica et Metallogenesis, 2009, 33(2):299-303.
- [22] 刘飞宇,巫建华,刘帅.赣杭带早白垩世粗面岩锆石 SHRIMP-U-Pb 年龄及其意义[J].东华理工大学学报(自然科学版),2009,32(4):330-335.
- Liu F Y, Wu J H, Liu S. Early Cretaceous Zircon SHRIMP U-Pb Age of the Trachyte and Its Significances of the Gan-Hang Belt[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science Edition), 2009, 32(4): 330-335.
- [23] 杨水源,蒋少涌,姜耀辉,等.江西相山流纹英安岩和流纹英安斑岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成及其地质意义[J].中国科学(地球科学),2010,40(8):953-969.
- Yang S Y, Jiang S Y, Jiang Y H, et al. Zircon U-Pb Geochronology, Hf Isotopic Composition and Geological Implications of the Rhyodacite and Rhyodacitic Porphyry in the Xiangshan Uranium Ore Field, Jiangxi Province, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 40(8):953-969.
- [24] 陈正乐,王永,周永贵,等.江西相山火山——侵入杂岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J].中国地质,2013,40(1):217-231.
- Chen Y L, Wang Y, Zhou Y G, et al. SHRIMP U-Pb Dating of Zircons from Volcanic-intrusive Complexes in the Xiangshan Uranium Orefield, Jiangxi Province, and Its Geological Implications[J]. Geology in China, 2013, 40(1):217-231.
- [25] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in situ U-Pb Zircon Geochronology [J]. Chemical Geology, 2004, 211:47-69.
- [26] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon Geochemistry and Magma Mixing, SE China: in-situ Analysis of Hf Isotopes Tonglu and Pingtan Igneous Complexes[J]. Lithos, 2002, 61:237-269.
- [27] Andersen T. Correction of Common Pb in U-Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1):59-79.
- [28] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 2003:1-70.
- [29] Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. The Crust of Cathaysia: Age, Assembly and Reworking of Two Terranes [J]. Precambrian Research, 2007, 158:51-78.

- [30] 吴元宝, 郑永飞. 锆石成因矿物学及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
Wu Y B, Zheng Y F. Minerageny of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [31] Jiang Y H, Ling H F, Jiang S Y, et al. Petrogenesis of a Late Jurassic Peraluminous Volcanic Complex and Its High-Mg, Potassic, Quenched Enclaves at Xiangshan, Southeast China [J]. Journal of Petrology, 2005, 46(6): 1121-1154.
- [32] 罗平, 吴淦国, 张达, 等. 北武夷生米坑铅锌矿床地质地球化学特征及成因探讨[J]. 地质力学学报, 2009, 15(4): 349-362.
Luo P, Wu G G, Zhang D, et al. Geochemistry and Genesis of Shengmikeng Lead-Zinc Deposit in Northern Wuyi, Eastern China [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(4): 349-362.
- [33] 张家菁, 施光海, 童贵生, 等. 浙江徐家墩鹅湖岭组含铜多金属矿火山岩的地球化学与年代学[J]. 地质学报, 2009, 83(6): 791-799.
Zhang J J, Shi G H, Tong G S, et al. Geochemistry and Geochronology of Copper and Polymetal-bearing Volcanic Rocks of the Erhuling Formation in Xujiadun, Zhejiang Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 791-799.
- [34] Yang L K, Wang F, Shen J L, et al. Lasing on Pyroclastic Rocks: A Case Study of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating on Moshishan Group, Eastern Zhejiang Province [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(24): 3876-3882.
- [35] 王非, 杨列坤, 王磊, 等. 中国东南晚中生代火山沉积地层界线时代—— $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及磁性地层研究[J]. 中国科学(地球科学), 2010, 40(11): 1552-1570.
Wang F, Yang L K, Wang L, et al. Late Mesozoic Volcanic Sedimentary Stratigraphic Boundary Era of Southeast China-Studies of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology and Magnetostratigraphy [J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 40(11): 1552-1570.
- [36] 邢光福, 陈荣, 杨祝良, 等. 东南沿海晚白垩世火山岩浆活动特征及其构造背景[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 77-91.
Xing G F, Chen R, Yang Z L, et al. Characteristics and Tectonic Setting of Late Cretaceous Volcanic Magmatism in the Coastal Southeast China [J]. Actor Petrologica Sinica, 2009, 25(1): 77-91.
- [37] 余明刚, 邢光福, 沈加林, 等. 雁荡山世界地质公园火山岩年代学研究[J]. 地质学报, 2006, 80(11): 1683-1690.
Yu M G, Xing G F, Shen J L, et al. Chronologic Study on Volcanic Rocks in the Mt. Yandangshan World Geopark [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(11): 1683-1690.
- [38] 陈荣, 邢光福, 杨祝良, 等. 浙东南英安质火山岩早侏罗世锆石 SHRIMP 年龄的首获及其地质意义[J]. 地质学报, 2007, 53(1): 31-35.
Chen R, Xing G F, Yang Z L, et al. Early Jurassic Zircon SHRIMP U-Pb Age of the Dacitic Volcanic Rocks in the Southeastern Zhejiang Province Determined Firstly and Its Geological Significances [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 53(1): 31-35.
- [39] 邢光福, 卢清地, 陈荣, 等. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山地区对比[J]. 地质学报, 2008, 82(4): 451-463.
Xing G F, Lu Q D, Chen R, et al. Study on the Ending Time of Late Mesozoic Tectonic Regime Transition in South China-comparing to the Yanshan Area in North China [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(4): 451-463.
- [40] 崔玉荣, 谢智, 陈江峰, 等. 浙东晚中生代玄武岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2010, 16(2): 198-212.
Cui Y R, Xie Z, Chen J F, et al. SHRIMP U-Pb Dating of Zircons from the Late Mesozoic Basalts in Eastern Zhejiang Province and Its Geological Significance [J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(2): 198-212.
- [41] Liu L, Xu X S, Zou H B. Episodic Eruptions of the Late Mesozoic Volcanic Sequences in Southeastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and Implications for the Geodynamics of Paleo-Pacific Subduction [J]. Lithos, 2012, 154: 166-180.
- [42] 李祥辉, 陈斯盾, 罗家洪, 等. 浙江西部建德群锆石 LA-ICP-MS 之 U-Pb 同位素年龄及其地层学意义[J]. 地质论评, 2011, 57(6): 825-836.
Li X H, Chen X D, Luo J H, et al. LA-ICP-MS U-Pb Isotope Chronology of the Single Zircons from Early Cretaceous Jiande Group in Western Zhejiang, SE China: Significances to Stratigraphy [J]. Geological Review, 2011, 57(6): 825-836.
- [43] 巫建华, 刘飞宇, 刘帅. 峡江—广丰和三南—寻乌火山岩带晚中生代粗面岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质论评, 2011, 57(1): 125-132.
Wu J H, Liu F Y, Liu S. SHRIMP U-Pb Zircon Age of Late Mesozoic Trachyte in Xiajiang-Guangfeng and Sannan (Quannan, Dingnan and Longnan)-Xunwu Volcanic Belts [J]. Geological Review, 2011, 57(1): 125-132.
- [44] 段政, 邢光福, 余明刚, 等. 浙闽边界区晚中生代火山作用时序与过程分析[J]. 地质论评, 2013, 11(1): 15-23.
Duan Z, Xing G F, Yu M G, et al. Time Sequence and Geological Process of Late Mesozoic Volcanic Activities in the Area of Zhejiang-Fujian Boundary [J]. Geological Review, 2013, 11(1): 15-23.
- [45] Guo F, Fan W M, Li C W, et al. Multi-stage Crust-mantle Interaction in SE China: Temporal, Thermal and Compositional Constraints from the Mesozoic Felsic

- Volcanic Rocks in Eastern Guangdong-Fujian Provinces [J]. *Lithos*, 2012, 150: 62–84.
- [46] Li L M, Sun M, Xing G F, et al. Two Late Mesozoic Volcanic Events in Fujian Province: Constraints on the Tectonic Evolution of Southeastern China [J]. *International Geology Review*, 2009, 51(3): 216–251.
- [47] 陈培荣,华仁民,章邦桐,等.南岭燕山早期后造山花岗岩类:岩石学制约和地球动力学背景[J].中国科学(地球科学),2002,32(4):279–289.
- Chen P R, Hua R M, Zhang B T, et al. Post-Orogenic Early Yanshanian Granitoids in the Nanling Region: Petrological Constraints and Geodynamic Settings [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(4): 279–289.
- [48] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution [J]. *Episodes*, 2006, 29(1): 26–33.
- [49] Li X H, Li Z X, Li W X, et al. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I- and A-type Granites from Central Guangdong, SE China: A Major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-Slab [J]. *Lithos*, 2007, 96: 186–204.
- [50] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300 km-wide Intracontinental Orogen and Post-Orogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-slab Subduction Model [J]. *Geology*, 2007, 35: 179–182.
- [51] 徐先兵,张岳桥,贾东,等.华南早中生代大地构造过程 [J].中国地质,2009,36(3): 573–591.
- Xu X B, Zhang Y Q, Jia D, et al. Early Mesozoic Geotectonic Processes in South China [J]. *Geology in China*, 2009, 36(3): 573–591.
- [52] 张岳桥,徐先兵,贾东,等.华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录 [J].地学前缘,2009,16(1): 234–247.
- Zhang Y Q, Xu X B, Jia D, et al. Deformation Record of the Change from Indosian Collision-related Tectonic System to Yanshanian Subduction-related Tectonic System in South China during the Early Mesozoic [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1): 234–247.

The Discovery of Late Jurassic Volcanic Rocks in Lengshuikeng, Jiangxi and Their Geological Significance

YU Ming-gang^{1,2}, ZHAO Xi-lin^{2*}, QIAN Mai-ping², DUAN Zheng³, ZHANG Xue-hui², WAN Hao-zhang³, XIAO Mao-zhang³, SUN Jian-dong²

(1. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China;

3. No. 912 Team, Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Yingtan 335001, China)

Abstract: The Jiangxi Lengshuikeng ore field, characterized as porphyry deposits and volcanic sedimentary hydrothermal reworking deposits, is one of the major Ag-Pb-Zn ore concentration areas in Wuyi Mountain area. There has been much research carried out on mineralization, the metallogenic model, and ore-controlling structure of the Lengshuikeng deposit. However, it is still unclear about the relationship of different geological bodies with mineralization and magmatism. In this paper, a description of a zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology approach and its implementation on the volcanic rock of Daguding Formation and ore-bearing granite porphyry is given. The crystal tuffs from the top and bottom of Daguding Formation and ore bearing granite porphyry yield U-Pb age of 161.3 ± 1.3 Ma, 160.75 ± 0.96 Ma and 168.09 ± 0.80 Ma, respectively. These results indicate that there were three stages of volcano-magmatic activities in the Lengshuikeng ore field with ages of 164–170 Ma, 157–161 Ma, and 140–146 Ma, respectively. The 157–161 Ma is the main metallogenic epoch of the volcanic sedimentary-hydrothermal reworking type deposit and porphyry type deposit. The discovery of the late Jurassic volcanic rocks in Lengshuikeng provides the important geological evidence for the detailed study of the Mesozoic tectonic regime transition in South China.

Key words: Daguding Formation; ore-bearing granite porphyry; Laser Ablation Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS); zircon U-Pb dating; tectonic transition; Lengshuikeng in Jiangxi