

浙江安吉多金属矿区坞山关杂岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义

唐燕文^{1,2)}, 谢玉玲¹⁾, 李应栩^{1,3)}, 邱立明¹⁾, 张欣欣¹⁾, 韩宇达¹⁾, 姜妍岑¹⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京, 100083;

2) 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳, 550002;

3) 中国地质调查局成都调查中心, 成都, 610082

内容提要:安吉港口多金属矿床在成因上与坞山关杂岩体密切相关, 该杂岩体包括黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩、花岗闪长岩和细粒花岗岩。本文采用岩相学、CL 和 LA-ICP-MS 等方法对前三套岩石单元中的锆石进行了成因矿物学、微区微量元素和 U-Pb 年代学特征等相关研究。年代学结果显示, 杂岩体大致形成于晚侏罗世—早白垩世, 按前述排列顺序, 三岩石单元成岩年龄分别为 $141.0 \pm 1.4\text{Ma}$ ($n=13, MSWD=1.3$), $138.1 \pm 1.0\text{Ma}$ ($n=14, MSWD=0.92$) 和 $137.0 \pm 1.8\text{Ma}$ ($n=13, MSWD=1.9$)。研究过程中发现的年龄为 $518 \pm 9\text{Ma}$ 和 $624 \pm 9\text{Ma}$ 的继承锆石, 暗示杂岩体成岩过程中有晋宁晚期和加里东早期古老地壳物质的熔融或同化混染。锆石 Ti 温度计显示, 杂岩体中黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩锆石结晶温度基本一致, 均值分别为 657°C 和 653°C , 钾长花岗岩锆石结晶温度略高, 均值为 698°C 。区域构造环境、岩体被动侵位、构造张性和张剪性特征表明, 矿区在约 $141 \sim 137\text{Ma}$ 前后已处于拉张—伸展构造背景之下, 杂岩体及其相关成矿作用受该环境控制。本次研究及野外调研结果表明, 杂岩体与矿区多金属矿床具有密切的时空关系。浙江淳安铜山锡矿、安吉多金属矿床成岩成矿数据表明, 钦—杭成矿带东段在晚侏罗世—早白垩世约 $148 \sim 134\text{Ma}$ 还存在一期成岩成矿作用。

关键词:浙西北; 坞山关杂岩体; 锆石 U-Pb 定年; 钦—杭成矿带 (QHMB); 构造环境; 成岩成矿时代

安吉港口铅锌多金属矿床位于钦(州)—杭(州)成矿带东段。钦—杭结合带为扬子与华夏古板块的结合带, 南西起钦州湾、北东至杭州湾, 长约 2000km , 宽 $100 \sim 150\text{km}$, 总体呈反 S 状弧形展布 (杨明桂等, 1997)。钦—杭成矿带 (QHMB) 即沿该结合带发育, 为中国东部典型成矿带之一。杨明桂等 (1997, 2009) 以萍乡为界划分钦—杭成矿带东、西两段, 东段以浏阳—景德镇—湖州断裂为北界, 以绍兴—萍乡断裂为南界, 贯穿江西北部、安徽南部、浙江西北部 (图 1a)。在钦—杭成矿带的西段发现有张公岭、龙头山等铅锌、铜金矿床以及水口山、康家湾、香花岭、黄沙坪、宝山、新田岭等大型或超大型钨铜铅锌锡矿床; 成矿带东段有德兴铜厂、银山等著名矿集区 (图 1a), 德兴矿集区一直是研究的重点。近年来东段找矿工作取得极大突破, 相继发现数十个大型矿点, 如江西有修水香炉山钨矿、武宁大沽塘

钨矿、永平铜铅锌矿、东乡枫林钨铜矿和德安张十八铅锌矿等, 皖南有宁国竹溪岭大型钨钼矿、东源大型钨钼矿、绩溪逍遥、际下、巧川中型钨矿等, 然而浙西找矿工作却迟迟未取得突破。2010 年度安吉矿区找矿工作的新进展, 填补了钦—杭成矿带浙西段找矿工作的空白。

安吉矿区位于浙江省安吉县港口乡, 矿区发育矽卡岩型铁铜锌、碳酸盐岩交代型铅锌铜、热液充填型铅锌和斑岩型铜钼等多种矿化, 2010 年间南京地质矿产研究所进行的普查工作提交资源量 ($333 + 3341$) 为铅 + 锌 19.23 万吨、银 265 吨、铜 1.4 万吨, 其中, 矿区铅 + 锌平均品位为 3.35% , 共一伴生银平均品位 52.7g/t 。矿区植被、第四系覆盖严重, 风化、蚀变较强, 野外露头可见性较差。前人针对杂岩体仅有少量研究, 如潘志龙 (1992) 对该杂岩体的相带以及花岗闪长岩和黑云母花岗岩的主量元素作

注: 本文为十二·五国家科技计划项目 (编号 2011BAB04B02)、科技部公益性行业基金项目 (编号 201011011-01) 和国家重点基础研究发展规划项目 (973) 课题“同熔型花岗岩铜铅锌成矿作用”的成果。

收稿日期: 2012-08-15; 改回日期: 2013-04-06。责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 唐燕文, 男, 1983 年生。博士研究生。主要从事成矿规律与成矿预测研究。Email: tyw_xt@tom.com。

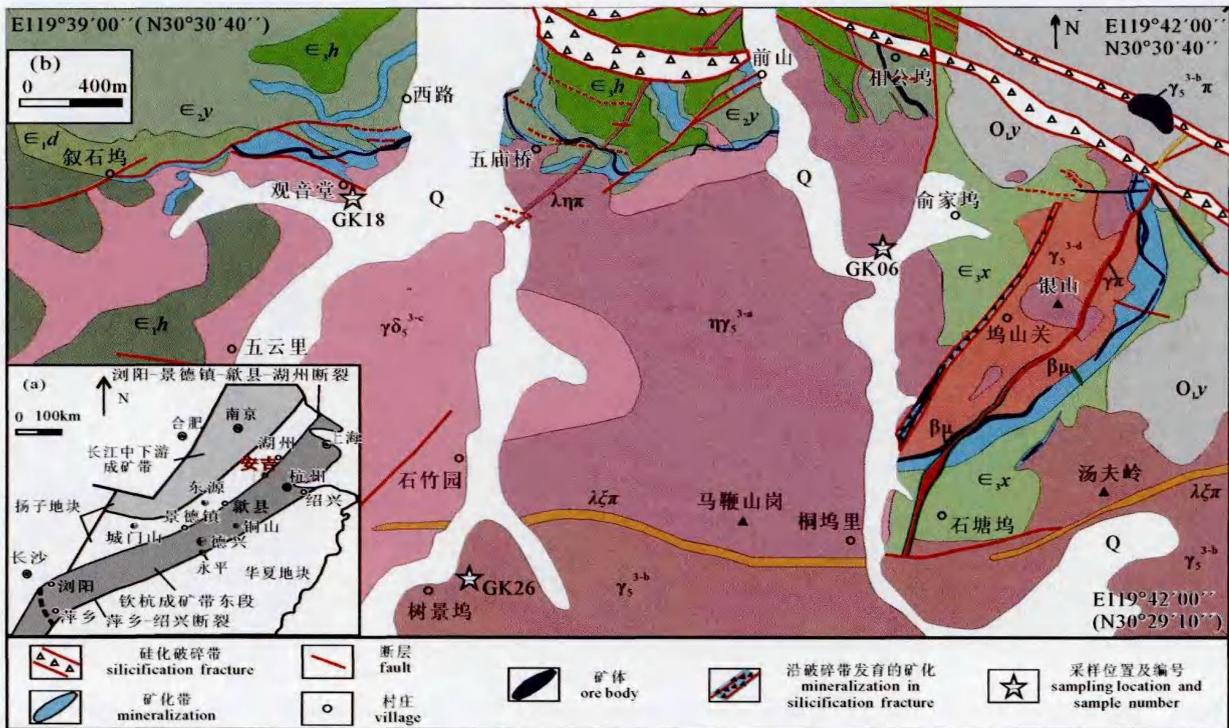


图 1 钦—杭成矿带东段简图(a) (据杨明桂等,1997)及安吉矿区地质图(b) (据王爱国等^①修绘)

Fig.1 The map of eastern section of the Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt (a) (after Yang Minggui et al., 1997) and geological map of Anji mining area (b) (modified from Wang Aiguo et al. ^①)

Q—第四系; O_1y —下奥陶统印渚塘组; ϵ_3x —上寒武统西阳山组; ϵ_3h —上寒武统华严寺组; ϵ_2y —中寒武统杨柳岗组; ϵ_1d —下寒武统大陈岭组; ϵ_1h —下寒武统荷塘组; $\eta\gamma_5^{3-a}$ —燕山晚期黑云母二长花岗岩; γ_5^{3-b} —燕山晚期钾长花岗岩; $\gamma\delta_5^{3-c}$ —燕山晚期花岗闪长岩; γ_5^{3-d} —燕山晚期(早白垩世)细粒花岗岩; $\gamma_5^{3-b}\pi$ —燕山晚期花岗斑岩; $\gamma\pi$ —环斑花岗岩脉; $\beta\mu$ —辉绿岩脉; $\lambda\eta\pi$ —石英二长斑岩; $\lambda\xi\pi$ —石英正长斑岩
 Q—Quaternary; O_1y —Lower Ordovician Yinzhubu Fm.; ϵ_3x —Upper Cambrian Xiyangshan Fm.; ϵ_3h —Upper Cambrian Huayansi Fm.; ϵ_2y —Middle Cambrian Yanliugang Fm.; ϵ_1d —Lower Cambrian Dachening Fm.; ϵ_1h —Lower Cambrian Hetang Fm.; $\eta\gamma_5^{3-a}$ —late Yanshanian biotite monzonitic granite; γ_5^{3-b} —late Yanshanian moyite; $\gamma\delta_5^{3-c}$ —late Yanshanian granodiorite; γ_5^{3-d} —late Yanshanian fine-grained granite; $\gamma_5^{3-b}\pi$ —late Yanshanian porphyry granite; $\gamma\pi$ —rapakivi granite; $\beta\mu$ —diabase; $\lambda\eta\pi$ —quartz monzonitic granite; $\lambda\xi\pi$ —quartz syenite

过简要分析,并认为该杂岩体与其周边的铅、硼、锡矿化关系密切。笔者等在研究区历经一年的阶段性普查之后,后来又经多次地质调研,发现矿区铅锌银、铜、钼矿化与坞山杂岩体关系密切,铅锌多金属矿体主要发育在杂岩体与寒武系碳酸盐岩地层接触带上。本文通过对杂岩体 LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 年龄及微量元素进行研究,以期对研究区主要的岩浆、成矿事件进行约束,结合东部成岩成矿作用时代信息,尝试对钦—杭成矿带东段典型矿床成岩成矿时代特征进行归纳。

1 矿区地质概况

安吉港口铅锌多金属矿床位于天目山、莫干山火山盆地之间,按杨明桂等(1997,2009)、贺菊瑞

(2008)划分方案,其大地构造位置处于连接扬子板块和华夏板块的钦(州)杭(州)结合带的东北边缘(图 1a)。除第四系外,矿区内出露的地层包括寒武系和奥陶系(图 1b),在区域上为整合接触,矿区内总体呈北西走向。奥陶系在矿区仅出露印渚塘组(O_1y),为粉砂质泥岩、泥岩;寒武系出露的地层由老到新分别为荷塘组、大陈岭组、杨柳岗组、华严寺组和西阳山组。荷塘组(ϵ_1h)为炭质、泥质、硅质页岩;大陈岭组(ϵ_1d)为灰岩;杨柳岗组(ϵ_2y),以泥质白云质灰岩、灰岩为主,其次为硅质泥岩、炭质页岩;华严寺组(ϵ_3h)为灰岩、泥质白云质灰岩;西阳山组(ϵ_3x)为白云质泥质灰岩、灰岩。

矿区内断裂构造发育,包括矿区中部叙石坞—俞家坞近 EW 向断裂带,矿区东部前山—俞家坞

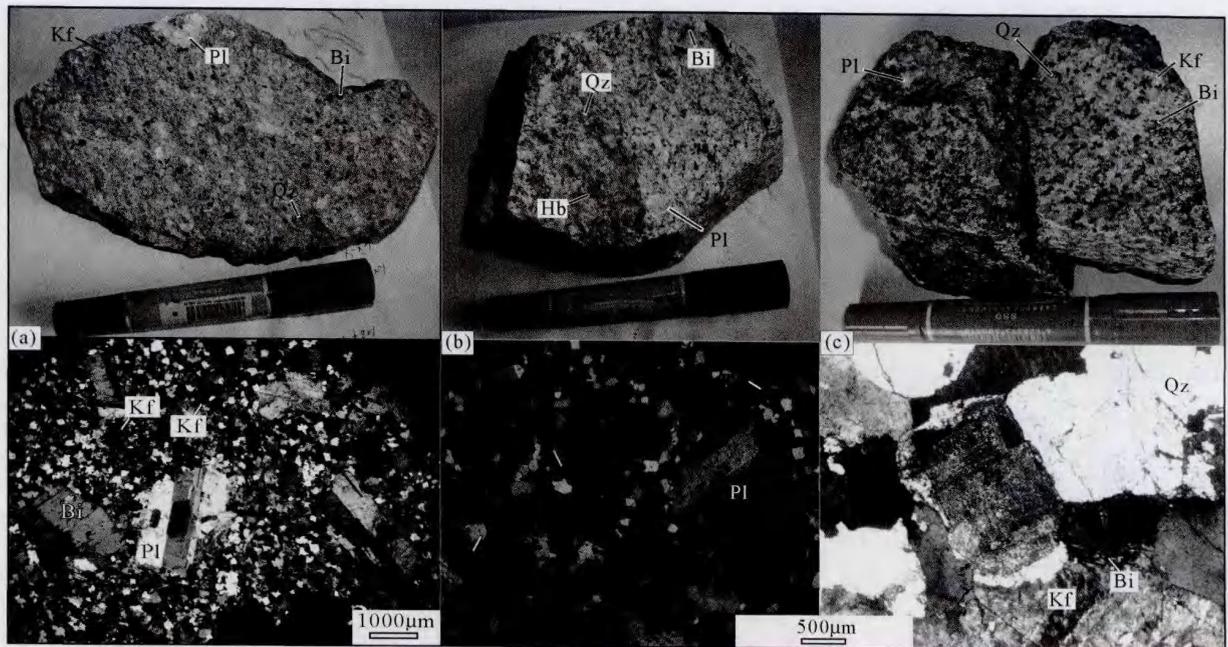


图2 坞山关杂岩体手标本及岩石薄片显微照片(正交偏光)

Fig. 2 The specimen photographs and microphotos (orthogonal polarization) of the first three units of Wushanguan complex body

(a) 黑云母二长花岗岩; (b) 花岗闪长岩; (c) 钾长花岗岩

(a) biotite-monzonitic granite; (b) moyite; (c) granodiorite

NW 向断裂带和矿区东南部坞山关 NE 向断裂带, 叙石坞—俞家坞 EW 断裂在前山地区汇入北西向断裂。矿区 NW、NE 断裂带分别为孝丰—三门湾大断裂和湖州—学川大断裂组成部分(浙江省区域地质志, 1985)。其中北东向断裂充填年龄为 137.3 ± 1.6 Ma 的石英二长斑岩脉(唐燕文等, 2012a), 北西向断裂主断裂充填梳状石英脉以及萤石脉, 并显示右行张剪特性, 东西向断裂在观音堂、五庙桥西部一带基本与铁铜锌矿化带重合。

矿区岩浆活动强烈, 呈多期次脉动式发育, 其中以坞山关杂岩体规模最大, 根据岩相鉴定(图2)以及岩石化学分析结果(唐燕文等, 2012b), 将杂岩体初步分为花岗闪长岩、黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩和细粒花岗岩四种岩石单元。黑云母二长花岗岩, 浅色矿物主要为钾长石、斜长石、石英, 暗色矿物以黑云母为主, 含少量自形一半自形钾长石斑晶。花岗闪长岩, 浅色矿物主要为斜长石、钾长石、石英, 暗色矿物包括黑云母和角闪石, 角闪石略多, 且以菱形晶及双晶为特征。钾长花岗岩, 等粒结构, 浅色矿物以钾长石、斜长石和石英为主, 暗色矿物以黑云母为主。黑云母二长花岗岩分布于矿区中部, 包括五庙桥岩体、相公坞岩体以及银山顶岩体局部, 出露面

积约 2km^2 ; 钾长花岗岩分布于矿区东部和南部, 包括汤夫岭岩体和树景坞岩体, 总面积约 2.3km^2 ; 花岗闪长岩包括银山顶岩体局部、叙石坞岩体、五云里岩体局部、五庙桥岩体西部和北部, 出露面积约 2km^2 。杂岩体中仅发现钾长花岗岩与黑云母二长花岗岩之间为断层或岩脉接触, 其它岩石单元之间未发现明显接触或侵位关系。此外, 俞家坞东北部, 有花岗斑岩小岩株出露, 在杂岩体和地层中还发育有辉绿岩、霏细岩、石英二长斑岩、辉绿岩和环斑花岗岩等岩脉。而杂岩体中另一岩石单元——细粒花岗岩, 为近来踏勘所发现, 其明显侵入黑云母二长花岗岩之中, 其成岩年龄约为 134Ma(谢玉玲等, 2012), 其岩相学、岩石化学、年代学因有专门报道, 该处不再赘述。

2 样品概述及分析方法和结果

岩石样品采自杂岩体三种不同岩石单元, 采样地点如图 1b 所示, 包括观音堂岩体、俞家坞村口相公坞岩体和矿区南部树景坞岩体, 样品新鲜无蚀变。

锆石单矿物挑选在河北廊坊区调研究所实验室利用标准技术分选完成, 之后, 用双目镜挑选大颗粒、晶形完好的锆石, 参照 Yuan Honglin 等(2003,



图 3 安吉矿区坞山关杂岩体锆石微区阴极发光照片、测点位置及对应²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄
 Fig.3 Cathodoluminescence photomicrographs, measured points and ²⁰⁶Pb/²³⁸U age data of zircons of Wushanguan complex body in Anji mining area

(a) 黑云母二长花岗岩; (b) 钾长花岗岩; (c) 花岗闪长岩
 (a) biotite-monzonitic granite; (b) moyite; (c) granodiorite

2004, 2008) 的方法进行制靶。制靶完成后, 采用阴极发光对锆石内部结构进行分析, 作为对所测微区原位年龄作出合理解释的依据 (Vavra et al., 1996, 1999; Wu Yuanbao et al., 2002, 2003; Wu Yuanbao and Zheng Yongfeng, 2004; 裴先治等, 2007)。阴极发光观察和照相工作在中国科学院地质与地球物理研究所扫描电子显微镜实验室完成。阴极发光照片及测点位置见图 3, 年龄谱和图见图 4。锆石的微区原位 U-Th-Pb 同位素测定在西北大学大陆动力学教

育部重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS) 上完成。测试时室温为 20℃, 相对湿度 30%, 仪器型号及参数见 Yuan Honglin 等 (2008)。测试采用 He 作为剥蚀物质的载气, 激光束斑直径为 30mm, 剥蚀深度为 20 ~ 40 mm。采用 GJ-1 为标准锆石校正同位素分馏, 每 5 ~ 10 个样品测点分析前后各测一次。测点元素含量分析以 Si 作为内标元素, 以美国国家标准技术研究院人工合

表1 浙江安吉多金属矿区坞山关杂岩体锆石 U—Th—Pb 同位素测定结果
Table 1 Data of zircons U—Th—Pb isotope of Wushanguan complex body in Anji mining area, Zhejiang province

岩性	样号	序号	Pb	U	Th	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	年龄 (Ma)		同位素比值							
							$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{207}\text{Pb})}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$			
							测值 ± 1σ	测值 ± 1σ	测值 ± 1σ	测值 ± 1σ	测值 ± 1σ	测值 ± 1σ	测值 ± 1σ			
黑云母—长花岗岩	CK06-07	1	60.14	680.33	535.05	0.79	138 ± 2	141 ± 6	0.0499	0.0024	0.1487	0.0068	0.0216	0.0003	0.0071	0.0001
	CK06-08	2	44.64	494.54	307.05	0.62	139 ± 2	151 ± 6	0.0531	0.0024	0.1600	0.0068	0.0218	0.0003	0.0083	0.0001
	CK06-15	3	78.02	906.12	600.36	0.66	139 ± 2	140 ± 5	0.0493	0.0021	0.1482	0.0060	0.0218	0.0003	0.0072	0.0001
	CK06-16	4	76.99	892.65	714.45	0.80	139 ± 2	154 ± 6	0.0543	0.0026	0.1635	0.0073	0.0218	0.0003	0.0075	0.0001
	CK06-2	5	1.25	491.87	7.58	0.02	139 ± 2	153 ± 3	0.0540	0.0019	0.1624	0.0038	0.0218	0.0003	0.0062	0.0001
	CK06-01	6	70.13	754.51	766.63	1.02	140 ± 2	143 ± 7	0.0498	0.0027	0.1509	0.0079	0.0220	0.0003	0.0077	0.0001
	CK06-13	7	51.24	571.67	495.34	0.87	140 ± 2	140 ± 7	0.0488	0.0027	0.1480	0.0079	0.0220	0.0004	0.0085	0.0001
	CK06-05	8	50.55	545.5	358.74	0.66	142 ± 2	145 ± 6	0.0497	0.0022	0.1531	0.0064	0.0224	0.0003	0.0077	0.0001
	CK06-14	9	57.2	646.6	481.04	0.74	142 ± 2	146 ± 6	0.0502	0.0023	0.1546	0.0066	0.0224	0.0003	0.0073	0.0001
	CK06-11	10	52.72	591.81	416.14	0.70	143 ± 2	156 ± 3	0.0540	0.0017	0.1665	0.0030	0.0224	0.0003	0.0072	0.0001
	CK06-03	11	61.64	661.74	440.89	0.67	144 ± 2	158 ± 3	0.0542	0.0017	0.1682	0.0030	0.0225	0.0003	0.0073	0.0001
	CK06-20	12	68.26	784.15	657.72	0.84	144 ± 2	155 ± 2	0.0530	0.0017	0.1648	0.0028	0.0226	0.0003	0.0072	0.0001
	GK06-1	13	1.12	355.05	5.52	0.02	144 ± 2	149 ± 4	0.0506	0.0020	0.1577	0.0046	0.0226	0.0004	0.0062	0.0001
	GK06-3	14	1.62	82.91	5.66	0.07	518 ± 9	544 ± 24	0.0615	0.0038	0.7095	0.0412	0.0837	0.0015	0.0277	0.0006
	GK06-04	15	91.14	215.3	117.9	0.55	624 ± 9	653 ± 15	0.0644	0.0022	0.9032	0.0283	0.1017	0.0015	0.0348	0.0004
钾长花岗岩	GK26-2	1	0.77	212.47	3.29	0.02	136 ± 2	135 ± 6	0.0549	0.0022	0.1624	0.0046	0.0215	0.0003	0.0075	0.0001
	GK26-3	2	0.81	172.36	2.94	0.02	136 ± 2	137 ± 7	0.0656	0.0026	0.1972	0.0056	0.0218	0.0003	0.0083	0.0002
	GK26-6	3	1.02	206.16	3.04	0.01	136 ± 2	143 ± 4	0.0512	0.0022	0.1508	0.0051	0.0214	0.0003	0.0071	0.0001
	GK26-08	4	135.8	1562.78	539.98	0.35	136 ± 2	151 ± 4	0.0686	0.0021	0.2055	0.0032	0.0218	0.0003	0.0090	0.0001
	GK26-09	5	61.77	703.92	487.47	0.69	137 ± 2	149 ± 6	0.0668	0.0021	0.2020	0.0033	0.0219	0.0003	0.0079	0.0001
	GK26-20	6	50.67	573.54	356.38	0.62	137 ± 2	135 ± 2	0.0481	0.0016	0.1425	0.0028	0.0215	0.0003	0.0059	0.0001
	GK26-8	7	1.75	198.26	3.30	0.02	138 ± 2	152 ± 5	0.0540	0.0024	0.1615	0.0058	0.0217	0.0003	0.0080	0.0002
	GK26-16	8	369.91	4181.97	8779.86	2.10	138 ± 2	148 ± 2	0.0525	0.0016	0.1569	0.0023	0.0217	0.0003	0.0060	0.0001
	GK26-10	9	0.83	125.50	2.19	0.02	139 ± 2	132 ± 6	0.0602	0.0026	0.1839	0.0063	0.0222	0.0004	0.0084	0.0002
	GK26-18	10	26.67	298.01	166.74	0.56	139 ± 2	150 ± 3	0.0529	0.0018	0.1591	0.0032	0.0218	0.0003	0.0060	0.0001
	GK26-19	11	163.54	1827.33	497.19	0.27	139 ± 2	141 ± 2	0.0497	0.0015	0.1495	0.0023	0.0218	0.0003	0.0062	0.0001
	GK26-02	12	39.89	425.66	291.99	0.69	141 ± 2	148 ± 9	0.1047	0.0034	0.3429	0.0060	0.0238	0.0004	0.0118	0.0002
	GK26-14	13	360.32	4008.09	458.42	0.11	141 ± 2	142 ± 2	0.0491	0.0015	0.1499	0.0022	0.0221	0.0003	0.0067	0.0001
	GK26-15	14	139.12	1546.98	1690.48	1.09	141 ± 2	142 ± 2	0.0493	0.0015	0.1503	0.0023	0.0221	0.0003	0.0055	0.0001

续表 1

岩性	样号	序号	Pb		U		Th		$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$		年龄 (Ma)			同位素比值				
			$(\times 10^{-6})$		$(\times 10^{-6})$		$(\times 10^{-6})$		$(\times 10^{-6})$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$	
			测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$	测值	$\pm 1\sigma$
花岗岩 闪长岩	GK18-20	1	61.34	133 ± 2	722.26	142 ± 2	485.71	0.67	0.0523	0.0017	0.1506	0.0027	0.0209	0.0003	0.0073	0.0001		
	GK18-15	2	78.20	134 ± 2	890.68	133 ± 6	698.28	0.78	0.0685	0.0022	0.2041	0.0034	0.0216	0.0003	0.0081	0.0001		
	GK18-18	3	56.87	134 ± 2	660.60	134 ± 5	452.97	0.69	0.0541	0.0017	0.1581	0.0027	0.0212	0.0003	0.0071	0.0001		
	GK18-19	4	111.73	134 ± 2	1300.59	138 ± 4	498.86	0.38	0.0545	0.0017	0.1588	0.0027	0.0212	0.0003	0.0073	0.0001		
	GK18-17	5	65.33	135 ± 2	758.04	138 ± 2	477.79	0.63	0.0497	0.0016	0.1455	0.0025	0.0212	0.0003	0.0074	0.0001		
	GK18-3	6	2.35	137 ± 3	203.07	145 ± 7	3.00	0.01	0.0520	0.0031	0.1537	0.0082	0.0215	0.0004	0.0067	0.0002		
	GK18-16	7	69.47	137 ± 2	794.34	147 ± 2	641.05	0.81	0.0526	0.0016	0.1562	0.0026	0.0215	0.0003	0.0070	0.0001		
	GK18-6	8	1.72	138 ± 2	323.79	143 ± 7	4.65	0.01	0.0504	0.0029	0.1509	0.0077	0.0217	0.0004	0.0065	0.0002		
	GK18-03	9	54.16	139 ± 2	609.82	141 ± 6	460.50	0.76	0.0533	0.0017	0.1609	0.0028	0.0219	0.0003	0.0072	0.0001		
	GK18-8	10	1.62	140 ± 2	414.71	143 ± 5	5.53	0.01	0.0499	0.0024	0.1508	0.0058	0.0220	0.0004	0.0061	0.0002		
	GK18-04	11	45.91	140 ± 2	513.83	154 ± 2	330.75	0.64	0.0538	0.0017	0.1635	0.0029	0.0220	0.0003	0.0076	0.0001		
	GK18-9	12	1.81	141 ± 3	228.31	140 ± 7	3.32	0.01	0.0487	0.0029	0.1481	0.0078	0.0220	0.0004	0.0067	0.0002		
	GK18-05	13	44.48	141 ± 2	492.43	143 ± 6	357.05	0.73	0.0545	0.0017	0.1674	0.0029	0.0223	0.0003	0.0074	0.0001		

注:表格中的数据均已进行了普通铅扣除。

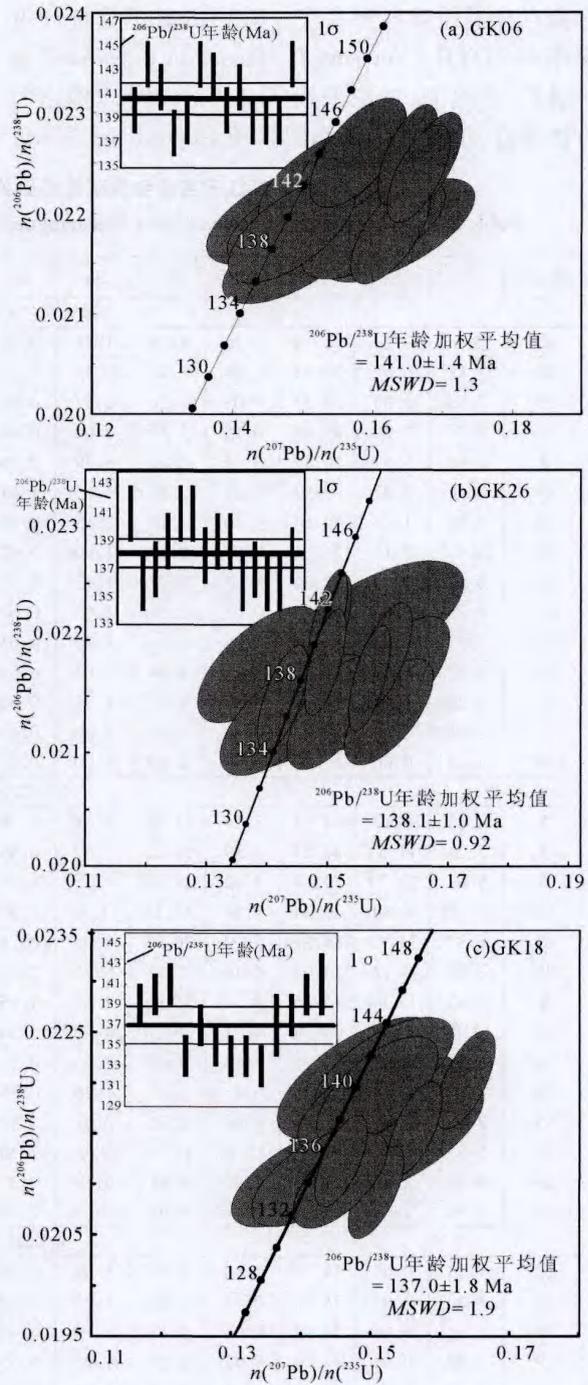


图 4 浙江安吉矿区坞山关杂岩体锆石 U-Pb 年龄谱和图
Fig. 4 Concordia diagrams of zircons LA-ICP-MS U-Pb dating from Wushuguan complex body in Anji mining area, Zhejiang province

- (a) 黑云母二长花岗岩 (GK06); (b) 钾长花岗岩 (GK26);
(c) 花岗闪长岩 (GK18)
(a) biotite-monzonitic granite (GK06); (b) moyite (GK26); (c) granodiorite (GK18)

成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 为标准参考物质,每 10 个测点分析前后各测一次。ICP-MS 数据处理计算采用 GLITTER (Version 4.0, Macquarie University) 软件进行,普通 Pb 校正采用 Anderson (2002) 提出的方法进行,年龄计算及作图采用 Isoplot (Ver 3.70)

(Ludwing, 2008) 完成。

测点尽量选择在没有包裹体的部位,获得的锆石微区原位 Th/U 值以及对应的普通铅校正之后的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值和年龄如表 1 所示,测点位置和对应的微区 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄如图

表 2 浙江安吉多金属矿区坞山关杂岩体锆石微区微量元素分析结果

Table 2 Trace elements of zircons from Wushanguan complex body in Anji mining area of Zhejiang province

测点号	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
黑云母二长花岗岩 (GK06)															
07	2.5	0.23	31.14	0.16	1.08	1.74	0.48	8.23	3.44	40.30	18.04	84.94	24.41	269.76	59.34
08	2.88	0.02	25.24	0.04	0.45	0.83	0.37	5.71	2.50	32.02	15.32	76.84	22.45	257.82	61.81
15	2.36	0.03	35.37	0.03	0.56	0.94	0.40	7.50	3.23	42.32	20.52	110.67	33.95	409.83	103.82
16	3.36	0.20	45.68	0.15	1.50	2.04	0.64	10.85	4.70	57.23	26.24	127.15	35.85	391.94	87.67
2	2.82	4.97	54.29	3.61	19.23	8.79	0.76	16.54	4.94	52.02	21.74	107.92	27.78	309.46	71.31
01	4.8	0.81	77.93	0.29	2.47	4.65	1.51	24.22	9.48	106.99	43.91	189.42	49.03	478.88	92.54
13	4.83	1.44	40.64	0.40	2.14	2.63	0.90	12.67	4.90	56.67	24.85	113.33	30.62	325.21	70.18
05	10.67	0.19	26.04	0.07	0.57	1.00	0.42	6.13	2.57	32.48	15.84	78.26	23.42	264.96	61.55
14	2.57	0.10	31.26	0.05	0.77	1.43	0.56	8.20	3.39	41.74	18.48	91.11	25.18	277.16	62.74
11	2.75	0.02	28.73	0.03	0.59	1.05	0.52	7.23	2.90	36.22	16.84	82.50	23.38	260.06	59.37
03	2.72	0.02	32.34	0.04	0.64	1.29	0.55	8.24	3.42	43.16	19.74	96.25	27.62	307.16	69.34
20	3.02	1.05	42.48	0.21	1.24	2.03	0.68	11.65	4.97	60.65	27.06	128.71	34.85	372.80	81.31
1	3.29	1.44	35.94	0.27	1.62	1.73	0.60	9.98	3.80	46.40	21.04	105.56	27.11	298.88	65.60
3	81.88	0.36	17.63	0.18	1.63	2.30	0.63	11.74	4.45	54.44	24.01	119.02	28.94	305.29	63.26
04	4.19	0.06	17.89	0.07	1.70	5.00	0.94	33.57	14.15	169.20	70.82	289.60	67.31	590.60	101.63
钾长花岗岩 (GK26)															
2	4.83	8.17	44.54	3.14	14.84	5.88	0.56	16.87	6.21	75.31	31.76	156.11	39.11	405.10	80.24
3	7.24	11.51	48.83	3.59	16.01	5.67	0.65	14.94	5.29	62.86	26.20	123.80	29.69	295.70	59.12
6	5.69	12.73	50.39	4.10	19.89	7.77	1.16	24.00	8.62	99.67	39.70	183.73	42.56	416.10	79.92
08	13.02	4.89	46.34	2.34	14.13	11.17	1.60	47.47	19.45	227.40	93.48	404.65	101.94	957.50	182.90
09	6.37	21.43	80.87	5.90	26.35	8.63	0.78	23.75	8.97	103.60	45.13	202.38	51.79	510.40	97.40
20	4.09	0.12	24.95	0.16	2.34	5.56	2.44	33.93	12.65	133.40	47.29	173.43	37.96	339.90	61.60
8	5.60	15.08	55.36	4.47	20.96	7.61	1.15	23.82	8.42	95.87	37.86	174.10	40.26	397.10	73.94
16	12.86	1.64	410.30	1.71	20.38	40.89	8.34	195.5	69.46	690.70	243.11	890.19	196.45	1607.00	265.80
10	6.88	8.07	32.65	2.15	9.06	2.83	0.51	8.47	3.11	38.46	16.22	79.62	19.74	210.70	41.21
18	4.80	1.44	22.43	0.45	2.23	1.76	0.36	10.72	4.71	57.91	25.51	118.06	31.00	308.60	60.20
19	2.05	0.04	10.49	0.04	0.75	2.87	0.42	22.05	11.54	146.20	60.24	256.54	62.06	571.70	99.37
02	6.53	65.79	216.60	32.12	153.5	77.47	2.30	99.61	24.45	172.20	50.88	188.89	45.26	421.10	76.19
14	4.10	2.72	21.13	1.60	8.91	6.59	0.31	33.11	17.79	237.20	103.60	464.35	124.36	1217.00	229.00
15	7.44	1851	3504.0	397.5	1494	290.8	7.16	217.9	36.89	247.00	70.94	248.70	54.05	461.40	77.17
花岗岩闪长岩 (GK18)															
20	7.43	0.09	24.78	0.08	0.69	1.05	0.40	5.91	2.31	30.48	14.75	72.33	20.82	237.34	56.68
15	3.00	2.07	35.46	0.44	1.75	1.23	0.50	6.94	3.18	39.04	19.10	96.52	26.75	303.56	77.35
18	2.67	0.06	28.92	0.06	0.43	1.19	0.44	6.63	2.95	39.20	18.84	97.23	27.95	320.90	77.83
19	3.00	0.69	37.04	0.42	2.67	1.95	0.55	10.03	4.56	58.68	29.05	151.45	42.37	478.19	121.59
17	3.39	3.20	49.16	0.61	2.63	1.94	0.64	11.11	4.75	62.22	30.24	154.22	44.38	495.21	114.91
3	5.10	0.32	21.34	0.12	1.28	1.27	0.45	7.93	3.49	43.56	20.10	103.43	27.08	306.72	69.44
16	2.51	0.02	32.18	0.04	0.64	1.10	0.51	7.71	3.15	39.08	18.28	90.22	25.59	289.76	68.46
6	2.63	0.31	24.67	0.10	0.59	1.02	0.37	6.44	2.49	32.41	14.52	75.21	19.55	229.91	54.12
03	2.90	0.58	37.12	0.15	1.02	1.76	0.61	10.28	4.31	52.73	23.19	111.84	31.02	337.30	76.22
8	2.27	3.26	30.18	0.49	2.57	1.23	0.41	6.08	2.35	33.25	15.00	83.51	22.00	267.03	65.33
04	2.74	0.57	26.32	0.12	0.92	1.19	0.45	6.35	2.64	33.40	15.71	76.58	22.13	248.50	55.78
9	2.96	0.09	20.89	0.06	0.53	0.92	0.38	5.20	1.91	26.15	11.18	58.87	15.74	183.41	41.81
05	5.63	0.33	27.83	0.09	0.93	1.75	0.68	9.34	3.87	48.04	21.49	101.52	28.27	303.21	67.41

注: U—Th—Pb 同位素测定与微量元素测定的斑点位置相同。

3 所示,对应的稀土微量元素如表 2 所示。

锆石的阴极发光(CL)图像显示,所测锆石多数为柱状、短柱状,自形晶,多见较完整的晶棱或晶锥,晶面整洁光滑,锆石短轴半径多在 80 ~ 100 μm 左右,长短轴比为 2: 1 ~ 3: 1,个别可达 4: 1。三大岩石单元中,多数锆石显示较清晰的岩浆韵律环带结构,LA-ICP-MS 测试主要针对锆石边部环带进行,由于锆石对 U-Th-Pb 同位素系统的封闭温度很高 (Cherniak and Watson, 2000, 2003),因此,继承锆石核还能反映岩浆岩的源区信息 (Vavra et al., 1996; Cherniak et al., 1997; Hu Jian et al., 2010),本次研究还对部分锆石核部进行了分析。

黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩和花岗闪长岩锆石 Th/U 比值主要分布范围为 0.55 ~ 1.02、0.11 ~ 2.10 和 0.38 ~ 0.81;但黑云母二长花岗岩中 GK06-1 和 GK06-2 为 0.02, GK06-3 为 0.07;钾长花岗岩中也有 5 个样品的 Th/U 值为 0.01 ~ 0.02;花岗闪长岩有 4 个样品 Th/U 为 0.01。测点的球粒陨石标准化稀土元素配分模式如图 5 所示,除 GK26-15 外,均显示重稀土富集的左倾模式,并且 Ce 显示正异常、Eu 负异常,与未受蚀变影响的岩浆锆石类似 (Hoskin and Ireland, 2000; Hoskin and Schaltegger, 2003)。GK26-15 与其余测点显著不同,其 ΣREE 明显偏高(表 3),不具有 Ce 异常,但 Eu 异常强烈(图 5),La 含量更是其他测点的 50 ~ 1000 倍。

3 讨论

3.1 锆石成因及锆石 U-Pb 年龄地质意义

3.1.1 锆石微区阴极发光特征

岩浆锆石最典型的特征为其发育较好的震荡环带(又称生长环带)和扇形环带 (Corfu et al., 2003, Hoskin and Schaltegger, 2003),而变质锆石阴极发光较弱,核部无环带或弱分带, (Wu and Zheng, 2004)。这是岩浆锆石和变质锆石最关键的区分之一。

按照锆石韵律环带及核部特征,本次研究的锆石大致分为三类:具明显韵律环带且无核或细核锆石、具明显韵律环带粗核锆石以及具弱环带、无环带锆石。阴极发光条件下,第一类锆石具明显韵律环带、且环带较宽,核部“中空”或见细小核,小核明亮度与环带一致,显示典型岩浆锆石特征,本次研究以该类锆石为主;第二类锆石边部也具有明显韵律环带,但核部较宽,且明亮程度与环带明显有差异,包括 GK06-15、GK06-01、GK06-14、GK06-1、GK06-04、GK18-20 锆石。第三类锆石阴极发光较暗,环带存

在但不特别明显,可能为热液锆石或受后期热液事件影响,包括 GK26-16、GK26-15 锆石。本次测试对象为第一、二类锆石延长端韵律环带、扇形环带区域、核部及第三类锆石边部。

3.1.2 锆石微区稀土微量特征

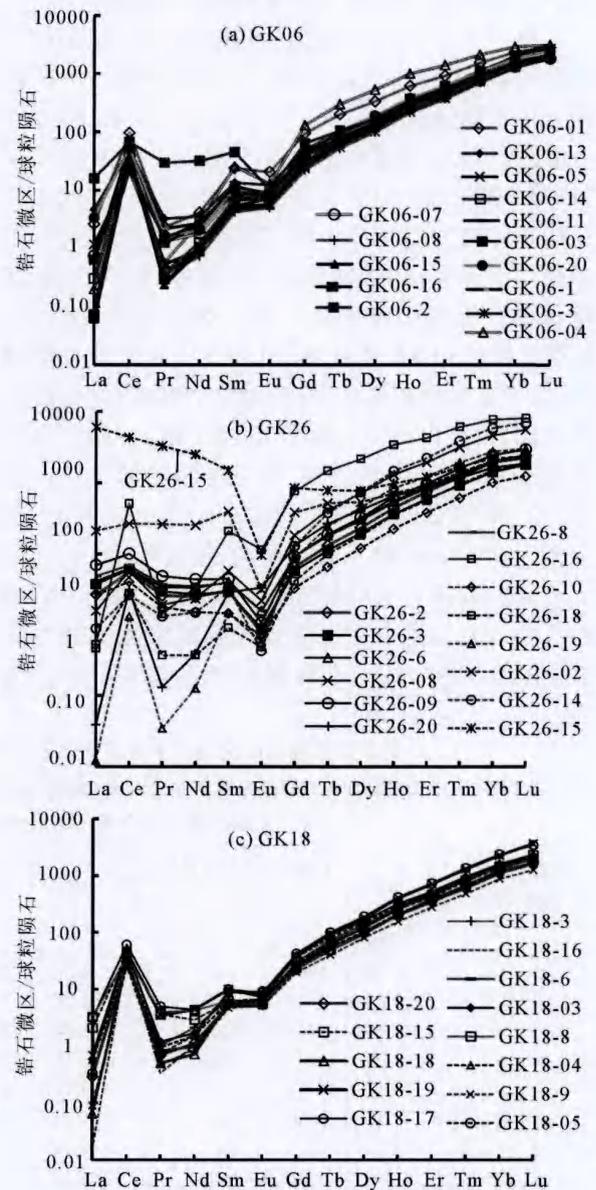


图 5 浙江安吉矿区杂岩体锆石微区稀土元素球粒陨石标准化配分图(球粒陨石标准化值据 Boynton, 1984)
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for zircon samples from Wushanguan complex body in Anji mining area, Zhejiang (Chondrite values are from Boynton, 1984)

(a) 黑云母二长花岗岩 (GK06); (b) 钾长花岗岩 (GK26); (c) 花岗闪长岩 (GK18)
(a) biotite-monzonitic granite (GK06); (b) moyite (GK26); (c) granodiorite (GK18)

岩浆锆石 Th/U 比值一般大于 0.1, 而变质锆石小于 0.1 (Belousova et al., 2002), 且多在 0.01 左右 (Rubatto et al., 2002, Hoskin and Schaltegger, 2003)。未蚀变的岩浆锆石 REE + Y 含量一般小于 1%, 稀土分布曲线呈左倾式重稀土富集型, Ce 常呈正异常、Eu 负异常 (Hoskin and Schaltegger, 2003)。

第一、二类锆石边部韵律环带测点中, 黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩和花岗闪长岩锆石 Th/U 比值主体范围分别为 0.55 ~ 1.02、0.11 ~ 2.10 和 0.38 ~ 0.81。对应的 $\Sigma \text{REE} + \text{Y}$ 分别为 980×10^{-6} ~ 3117×10^{-6} 、 956×10^{-6} ~ 11216×10^{-6} 和 753×10^{-6} ~ 1923×10^{-6} , 除 GK26-16、GK26-15 接近 1% 之外, 其余均小于 1%; 除 GK26-15 外, 所有测点稀土元素球粒陨石标准化分布模式表现为强烈的左倾式、HREE 相对 LREE 明显富集 (图 5), 同时具有强烈的 Ce 正异常和较强的 Eu 负异常。其中, 黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩和花岗闪长岩 $\text{Ce}_N/\text{Ce}_N^*$ 分别为 2.95 ~ 272.95 (均值 84.74)、0.94 ~ 55.52 (均值 12.12) 和 10.3 ~ 229.3, (均值 63.55), $\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$ 值分别为 0.17 ~ 0.42、0.05 ~ 0.42 和 0.31 ~ 0.42。

第三类锆石 GK26-16 锆石测点 $\Sigma \text{REE} + \text{Y}$ 为 11216×10^{-6} , 稀土分布模式均表现为强烈的左倾式、HREE 相对 LREE 明显富集, 对应的 $\text{Ce}_N/\text{Ce}_N^*$ 为

52.56, $\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$ 值为 0.24, Th/U 比值为 2.1。锆石 GK26-15 的 $\Sigma \text{REE} + \text{Y}$ 为 10908×10^{-6} , 稀土分布模式右倾, LREE 具有相对较高的含量 (图 5b), 与热液锆石 REE 模式相似, $\text{Ce}_N/\text{Ce}_N^*$ 分别为 0.94, 而对应的 $\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$ 值分别为 0.08, Th/U 比值为 1.09。

本次研究的锆石测点在 Grimes 等 (2007) 总结出的 U/Yb-Y 图解上投影在陆壳区 (图 6), 显示其均结晶于陆壳环境, 且没有因测点位置和微区 U-Pb 年龄不同而存在显著差异。这与 CL 等研究结果一致, 表明本次研究的锆石, 尤其继承锆石无洋壳等其他来源。

综上所述, 本次研究中, 第一、二类岩浆锆石边部环带区域的测点均反映岩浆锆石成岩年龄, GK26-16、GK26-15 测点可能反映的是受同期岩浆—热液事件不同程度影响后的岩浆锆石年龄。

Watson 等 (2005, 2006) 和通过实验给出了锆石中 Ti 含量与其结晶温度的拟合方程: $\lg [w(\text{Ti})/10^{-6}] = 6.01 \pm 0.03 - (5080 \pm 30)/T$;

式中, $w(\text{Ti})$ 为锆石中 Ti 的含量, T 为绝对温度, 单位为 K。

本文研究的杂岩体岩浆锆石属于适用范围。据该方程计算的锆石结晶温度如表 3 所示, 黑云母二长花岗岩锆石结晶温度范围 628 ~ 747°C, 平均

表 3 浙江安吉矿区坞山关杂岩体锆石微区稀土元素相关参数及锆石结晶温度计算结果

Table 3 Crystallization temperature of zircons and some parameters of trace elements of zircons from Wushanguan complex body in Anji mining area of Zhejiang province

测点编号	δEu	δCe	$\Sigma\text{REE} + \text{Y}$	锆石结晶温度 (°C)	测点编号	δEu	δCe	$\Sigma\text{REE} + \text{Y}$	锆石结晶温度 (°C)	测点编号	δEu	δCe	$\Sigma\text{REE} + \text{Y}$	锆石结晶温度 (°C)
GK06					GK26					GK18				
07	0.32	36.78	1091	632	2	0.16	2.12	1832	681	20	0.38	63.40	927	715
08	0.38	150.93	980	642	3	0.20	1.82	1467	713	15	0.41	15.43	1234	645
15	0.32	272.95	1464	628	6	0.24	1.67	2134	694	18	0.38	126.17	1224	637
16	0.33	59.53	1593	653	8	0.18	3.28	4717	765	19	0.31	22.03	1876	645
2	0.19	2.95	1391	641	9	0.16	1.70	2440	703	17	0.33	14.82	1923	654
01	0.35	38.80	2296	680	20	0.42	36.47	2193	668	3	0.33	39.50	1249	685
13	0.39	12.74	1413	681	8	0.24	1.61	2052	692	16	0.39	229.31	1142	632
05	0.40	55.51	1006	747	16	0.24	52.56	11216	763	6	0.33	54.05	942	636
14	0.39	111.07	1130	634	10	0.30	1.85	956	709	03	0.34	51.80	1393	643
11	0.42	226.58	1038	639	18	0.19	6.65	1372	680	8	0.37	10.30	1055	625
03	0.39	195.65	1216	638	19	0.11	55.52	2872	618	04	0.40	42.87	967	639
20	0.33	20.73	1573	645	2	0.08	1.13	3002	705	9	0.42	92.80	753	644
1	0.35	13.02	1279	652	14	0.05	2.39	5357	668	05	0.41	63.64	1257	693
3	0.30	16.32	1352	967	15	0.08	0.94	10908	715					
04	0.17	57.47	3117	670										

注: 表中所列温度为锆石中 Ti 含量与其结晶温度的拟合方程 $\lg [w(\text{Ti})/10^{-6}] = 6.01 \pm 0.03 - (5080 \pm 30)/T$ 计算。式中, $w(\text{Ti})$ 为锆石中 Ti 的含量, T 为绝对温度, 单位为 K。

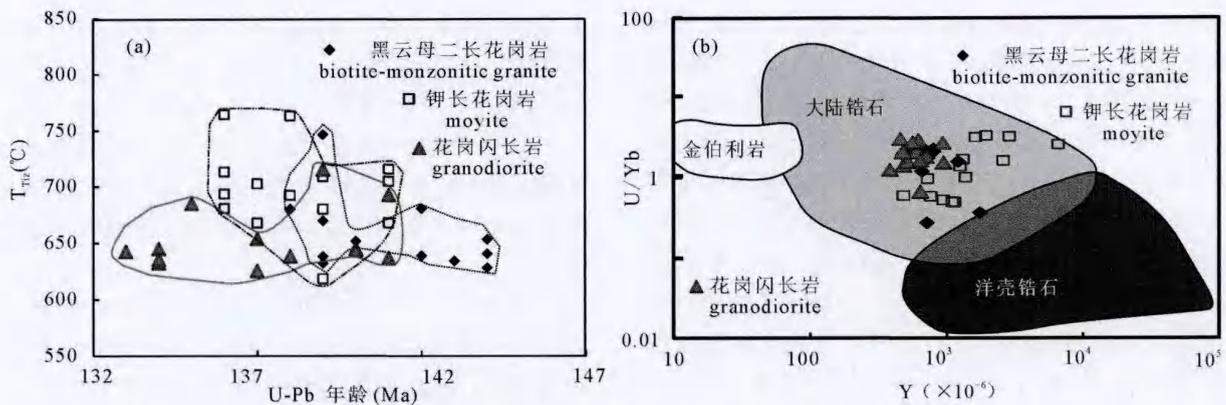


图6 (a) T_{zir} —锆石 U-Pb 年龄变异图; (b) 陆壳—洋壳锆石 U/Yb-Y 微量元素图解 (底图据 Grimes et al., 2007)

Fig. 6 (a) T_{zir} vs U-Pb age diagrams of zircons; (b) Discriminant diagrams with continental and ocean crust zircon by U/Yb - Y (after Grimes et al., 2007)

657°C, 另外具继承锆石特征的 GK06-04 锆石结晶温度为 967°C; 钾长花岗岩锆石结晶温度范围 618 ~ 765°C, 平均 698°C; 花岗闪长岩锆石结晶温度范围 625 ~ 715°C, 平均 653°C。锆石结晶 T_{zir} 温度与 U-Pb 年龄联合图解显示, 花岗闪长岩的锆石开始结晶的温度较高, 之后随年龄变新而降低, 显示岩浆作用正常冷却降温趋势, 结晶过程中没有深部高温物质的再度加入。而黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩总体均呈现上升趋势, 且后者温度总体要比前者高, 可能说明两岩浆体系结晶过程中有深部高温物质再度上涌, 根据 T_{zir} —锆石 U-Pb 年龄变异图中三岩体重叠情况来看, 这次深部物质上涌事件可能与花岗闪长岩的形成有关。

3.1.3 锆石 U-Pb 定年地质意义

黑云母二长花岗岩中, 除 GK06-3、GK06-04 两测点年龄明显偏老之外, 其余 13 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 144 ~ 138Ma (表 1), 加权平均值为 $141.0 \pm 1.4\text{Ma}$ ($n = 13$, $MSWD = 1.3$) (图 4a); 钾长花岗岩中, 14 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 141 ~ 136Ma (表 1), 加权平均值为 $138.1 \pm 1.0\text{Ma}$ ($n = 14$, $MSWD = 0.92$) (图 4b); 花岗闪长岩中, 13 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 141 ~ 133Ma (表 1), 加权平均值为 $137.0 \pm 1.8\text{Ma}$ ($n = 13$, $MSWD = 1.9$) (图 4c), 三岩石单元中锆石年龄值变化范围小, 在一致曲线图中, 数据点成群分布 (图 4), 锆石年龄加权平均值能代表岩石形成年龄, 故杂岩体大致形成于晚侏罗—早白垩世约 141 ~ 137Ma, 且黑云母二长花岗岩最老, 钾长花岗岩其次, 花岗闪长岩最新, 这与野外地

质现象基本吻合。

一般认为, 古老地壳熔融或地壳混染形成的花岗岩岩石会有老的继承锆石 (Tchameni et al., 2001; Wang Yuejun et al., 2002), 花岗岩体中的继承锆石成为研究岩浆源区的指示剂 (Sue et al., 1999)。继承锆石中, 黑云母二长花岗岩 GK06-3 锆石核测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $518 \pm 9\text{Ma}$, GK06-04 锆石边部测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $624 \pm 9\text{Ma}$, 这两个年龄可能反映的是晋宁晚期和加里东早期岩浆—热液活动的相关记录, 暗示形成杂岩体的过程中有古老地壳物质部分熔融或同化混染。

3.2 成岩成矿作用时代

根据测试结果以及细粒花岗岩成岩年龄约为 $134.5 \pm 1.6\text{Ma}$ 和 $133.9 \pm 1.3\text{Ma}$ (谢玉玲等, 2012), 杂岩体成岩年龄为 $133.9 \pm 1.3 \sim 141.0 \pm 1.4\text{Ma}$, 大致处于晚侏罗世—早白垩世阶段, 而矿区辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄介于 $137.8 \pm 1.9 \sim 139.1 \pm 2.0\text{Ma}$ 之间, 加权平均年龄为 $138.58 \pm 0.72\text{Ma}$ (1σ 误差, $MSWD = 0.25$) (待刊资料), 说明矿区成岩成矿年龄在误差范围内一致。考虑到研究区内矿化体发育于杂岩体周边接触带及岩体内, 表明区内岩浆作用与成矿作用密切相关。

中国东部于燕山期 100 ~ 170Ma 左右, 出现了一次大规模或大爆发成矿事件 (毛景文等, 1999, 2000, 2004a; 华仁民等, 1999, 2005a, 2005b; 杨明桂等, 2009; 毛建仁等, 2009), 而在钦—杭成矿带东段中, 德兴斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为 170Ma (Lu Jianjun et al., 2005), 成矿花岗闪长斑岩

SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $171 \pm 3\text{Ma}$ (王强等, 2004); 江西永平铜矿成矿年龄约 160Ma , 成矿黑云母花岗岩年龄为 160Ma (丁昕等, 2005); 安徽逍遥坞、铜多金属成矿岩体 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 141Ma (侯明金, 2005; 唐永成等, 2010), 浙江淳安铜山锡矿成矿年龄约为 143Ma , 与成矿岩体年龄为 147Ma (朱安庆, 2009), 结合安吉矿区成岩成矿时代数据, 表明除德兴为代表的一次成矿作用外, 钦—杭成矿带东段在晚侏罗世—白垩世约 $148 \sim 135\text{Ma}$ 之间还存在一期成岩成矿作用, 鉴于长江中下游成矿带大规模成岩成矿作用时代为 $146 \sim 133\text{Ma}$ (Sun Weidong et al, 2003; 梅燕雄等, 2005; 蒙义峰等, 2004; 曾普胜等, 2004; 毛景文等, 2004b; 李进文等, 2007), 说明这两个成矿带在时间上是叠合的。近来, 毛景文等 (2011) 通过统计大量成岩成矿时代数据, 认为除中侏罗世成岩成矿作用之外, 钦—杭成矿带还存在晚侏罗世与花岗岩有关的成矿作用, 并且从该矿带中部往西部逐渐变新, 即从 175Ma 到 155Ma 。事实上, 从成矿带中部德兴地区往东部浙西—皖南一带成岩成矿时代也逐渐变新, 大致从 170Ma 到 134Ma , 并且晚侏罗世—早白垩世阶段的成岩成矿作用不局限于钦—杭成矿带及长江中下游成矿带, 明显扩展至交汇部位及其附近, 代表性矿点有江西城门山斑岩型铜矿和安徽东源斑岩型钨钼矿, 前者辉钼矿 Re-Os 同位素年龄约 140Ma , 也代表成矿岩体年龄 (吴良士等, 1997), 后者成矿花岗岩闪长斑岩 SHRIMP U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 同位素年龄一致, 约 146Ma (周翔等, 2011)。这些认识及浙西找矿工作的突破为中国东部找矿工作提供了新的找矿思路。

3.3 岩石形成构造环境

安吉矿区杂岩体主要呈不规则状分布 (图 1b), 岩体未发现挤压变形特征, 岩浆面理和变形面理不发育, 岩体与围岩呈不规则的多边形或枝杈状接触, 五庙桥、俞家坞一带岩体以弯曲岩枝贯入围岩现象特别明显, 矿区多处钻孔发现黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩大致顺层或沿断裂侵入围岩, 而接触带处围岩未发生变形, 并保留原有构造。这些特征显示矿区岩浆被动侵入特征。结合研究区在白垩纪早期活跃的北西向断裂显示的张性和张剪特性, 说明研究区大致在 $141 \sim 137\text{Ma}$ 期间已处于拉张—伸展构造背景之下。

4 结论

(1) 坞山关杂岩体形成于晚侏罗世—早白垩

世, 其组成单元黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩和花岗闪长岩成岩年龄分别为 $141.0 \pm 1.4\text{Ma}$ ($n = 13$, $MSWD = 1.3$)、 $138.1 \pm 1.0\text{Ma}$ ($n = 14$, $MSWD = 0.92$) 和 $137.0 \pm 1.8\text{Ma}$ ($n = 13$, $MSWD = 1.9$)。

(2) 杂岩体中发现的继承锆石 U-Pb 年龄为 $518 \pm 9\text{Ma}$ 和 $624 \pm 9\text{Ma}$, 暗示杂岩体成岩过程中有晋宁晚期和加里东早期古老地壳物质部分熔融或同化混染。

(3) 锆石结晶 T_{Tx} 温度记录显示, 黑云母二长花岗岩锆石结晶温度范围 $628 \sim 747^\circ\text{C}$, 平均 657°C , 钾长花岗岩锆石结晶温度范围 $618 \sim 764^\circ\text{C}$, 平均 698°C , 花岗闪长岩锆石结晶温度范围 $625 \sim 715^\circ\text{C}$, 平均 653°C 。锆石结晶 T_{Tx} 温度与 U-Pb 年龄联合图解显示, 黑云母二长花岗岩、钾长花岗岩结晶过程中 T_{Tx} 温度升高可能与花岗闪长岩成岩事件所代表深部高温物质再度上涌有关, 而花岗闪长岩锆石结晶在第一次降温之后一直变化不大, 表明岩浆结晶环境及过程相对稳定。

(4) 结合区域大地构造背景研究成果以及杂岩体被动侵位、断裂构造张性和张剪性特征, 说明矿区在 $141 \sim 137\text{Ma}$ 前后已处于拉张—伸展构造背景之下, 杂岩体及其相关的成矿作用受该背景控制。

(5) 江西德兴斑岩铜矿床、江西永平铜矿、浙江淳安铜山锡矿以及浙江安吉多金属矿床成岩成矿数据表明, 除燕山早期约 $170 \sim 160\text{Ma}$ 成岩成矿作用之外, 钦—杭成矿带东段在晚侏罗世—早白垩世约 $148 \sim 134\text{Ma}$ 期间还存在一期成岩成矿作用, 并且这期成岩成矿作用与长江中下游成矿带大规模成岩成矿作用时代 ($146 \sim 133\text{Ma}$) 大致吻合。钦—杭成矿带从中部德兴地区往东部浙西—皖南一带成岩成矿时代也逐渐变新, 大致从 170Ma 到 134Ma , 晚侏罗世—早白垩世阶段的成岩成矿作用不局限于两矿带内部, 明显扩展至两矿带交汇部位及附近。

致谢: 岩石地球化学样采集过程中得到 2010 年港口普查项目组王爱国高工、贺菊瑞研究员、李斌工程师等人的热心帮助, 2011 ~ 2012 年间调研过程中得到铜陵金九集团公司徐延军先生以及浙江第一地质大队朱绍富和张志其工程师的帮助, 在此表示感谢! 样品处理测试过程中, 得到郭翔硕士、周俊杰硕士、韩宇达硕士、西北大学柳小明高工和弓化栋老师、中国科学院地质与地球物理研究所闫欣女士和张泉敏博士等人的帮助, 审稿专家和章雨旭编辑对本文的完善提出了很好的建议, 在此一并致谢!

注 释 / Note

- ① 王爱国, 贺菊瑞, 唐燕文, 等. 2010. 浙江省安吉县港口地区金多金属矿地质报告. 南京: 南京地质矿产研究所, 1~100(内部资料).

参 考 文 献 / References

- 丁昕, 蒋少涌, 倪培, 顾连兴, 姜耀辉. 2005. 江西武山和永平铜矿含矿花岗质岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学. 高校地质学报, 11(3): 383~389.
- 侯明金. 2005. 江南隆起带(安徽部分)燕山晚期岩浆活动与深部过程. 导师: 朱光, 合肥: 合肥工业大学博士论文.
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发. 矿床地质, 18(4): 300~307.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 姚军明, 林锦富, 张展适, 顾显彦. 2005a. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景. 高校地质学报, 11(3): 291~304.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005b. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用. 矿床地质, 24(2): 99~107.
- 贺菊瑞, 芮行健, 王爱国, 等著. 2008. 皖浙相邻地区层控铜多金属矿床成矿系统及找矿预测. 北京: 地质出版社, 8~13.
- 李进文, 李旭辉, 裴荣富, 梅燕雄, 王永磊, 屈文俊, 黄修保, 臧文栓. 2007. 江西武山铜矿南矿带辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质学报, 81(6): 801~807.
- 毛景文, 华仁民, 李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区. 矿床地质, 18(4): 291~297.
- 毛景文, 王志良. 2000. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨. 矿床地质, 19(4): 289~296.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004a. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘, 11(1): 46~55.
- 毛景文, Stein H, 杜安道, 周涛发, 梅燕雄, 李永峰, 臧文栓, 李进文. 2004b. 长江中下游地区铜金(铂)矿 Re-Os 年龄测定及其对成矿作用的指示. 地质学报, 78(1): 121~131.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦-杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. 地质学报, 85(5): 636~658.
- 毛建仁, 高桥浩, 厉子龙, 中岛隆, 叶海敏, 赵希林, 周洁, 胡青, 曾庆涛. 2009. 中国东南部与日本中-新生代构造-岩浆作用对比研究. 地质通报, 28(7): 844~856.
- 梅燕雄, 毛景文, 李进文, 杜安道. 2005. 安徽铜陵大团山铜矿床层状矽卡岩矿体中辉钼矿 Re-Os 年龄测定及其地质意义. 地球学报, 26(4): 327~331.
- 蒙义峰, 杨竹森, 曾普胜, 徐文艺, 王训成. 2004. 铜陵矿集区成矿流体系统时限的初步厘定. 矿床地质, 23(3): 271~280.
- 吴良士, 邹晓秋. 1997. 江西城门山铜矿铼-钼同位素年龄研究. 矿床地质, 16(4): 376~381.
- 潘志龙. 1992. 浙江港口硼矿床地质特征及成矿条件初探. 矿物岩石, 12(3): 92~97.
- 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 刘会彬, 李佐臣, 李王晔, 刘战庆, 孟勇. 2007. 西秦岭北缘新元古代花岗岩片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质学报, 81(6): 772~786.
- 唐永成, 曹静平, 支利庚, 程乃福, 汪应庚, 王建伟, 胡海风. 2010. 皖东南区域地质矿产评价. 北京: 地质出版社, 96~97.
- 唐燕文, 谢玉玲, 李应栩, 邱立明, 刘保顺, 李媛, 张欣欣, 姜妍岑, 韩宇达, 周俊杰. 2012a. 浙江安吉多金属矿区石英二长斑岩岩石化学特征和锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 现代地质,

26(4): 647~655.

- 唐燕文, 谢玉玲, 李应栩, 邱立明, 刘保顺, 李媛, 张欣欣, 姜妍岑, 韩宇达. 2012b. 浙江安吉坞山关杂岩体岩相学和岩石地球化学特征及岩石成因. 矿床地质, 31(4): 903~916.
- 王强, 赵振华, 简平, 许继峰, 包志伟, 马金龙. 2004. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学. 岩石学报, 20(2): 315~324.
- 谢玉玲, 唐燕文, 李应栩, 邱立明, 刘保顺, 李媛, 张欣欣, 韩宇达, 姜妍岑. 2012. 浙江安吉铅锌多金属矿区细粒花岗岩的岩石化学、年代学及成矿意义探讨. 矿床地质, 31(4): 891~902.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征. 华南地质与矿产, (3): 52~59.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用. 中国地质, 36(3): 528~543.
- 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 裴荣富, 王彦斌, 王训成, 徐文艺, 田世洪, 姚孝德. 2004. 安徽铜陵矿集区燕山期岩浆流体系时空结构与成矿. 矿床地质, 23(3): 298~319.
- 朱安庆, 张永山, 陆祖达, 张春霖. 2009. 浙江省金属非金属矿床成矿系列和成矿区带研究. 北京: 地质出版社, 346.
- 浙江省地质矿产局. 1989. 浙江省区域地质志. 地质出版社, 519~527.
- 周翔, 余心起, 王德恩, 张德会, 李春麟, 傅建真, 董会明. 2011. 皖南东源含 W、Mo 花岗闪长斑岩及成矿年代学研究. 现代地质, 25(2): 201~210.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . Chemical Geology, 192: 59~79.
- Boynnton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: Henderson P, (ed). Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineral Petrology, 143(5): 602~622.
- Cherniak D J, Hanchar J M and Watson E B. 1997. Diffusion of tetravalent cations in zircon. Contributions to Mineralogy and Petrology, 127(4): 383~390.
- Cherniak D J and Watson E B. 2000. Pb diffusion in zircon. Chemical Geology, 172: 5~24.
- Cherniak D J and Watson E B. 2003. Diffusion in zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 113~143.
- Croft F, Hanchar J M, Hoskin P W O and Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 469~500.
- Grimes C B, John B E, Kelemen P B, Mazdab F K, Wooden J L, Cheadle M J, Hanch J K and Schwartz J J. 2007. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. Geology, 35(7): 643~646.
- Hoskin P W O and Ireland T R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. Geology, 28(7): 627~630.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 27~62.
- Hu Jian, Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Wang Xiaolei and Li Zhen. 2010. Geochronology and geochemistry of gneissic metagranites in eastern Dabie Mountains: Implications for the Neoproterozoic tectonomagmatism along the northeastern margin of the Yangtze Block. Science China: Earth Science, 53(4): 501~517.
- Ludwig R K. 2008. User's manual Isoplot 3.70. Berkeley Geochronology

- Center Special Publication, (4): 1~76.
- Lu Jianjun, Hua Renming and Yao Chunliang. 2005. Re-Os age for molybdenite from the Dexing porphyry Cu-Au deposit of Jiangxi Province, China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69 (Supp. A): 882.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1~2): 123~138.
- Sun Weidong, Xie Zhi, Chen Jiangfeng, Zhang Xun, Chai Zifang, Du Andao, Zhao Junshen, Zhang Chenhuo, Zhou Taofa. 2003. Os-Os dating of copper and molybdenum deposits along the Middle and Lower reaches of the Yangtze river, China. *Economic Geology*, 98(1): 175~180.
- Sue K, David S, William C. 1999. Identifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: an application to the Lachlan foldbelt. *Contribution Mineral Petrology*, 137: 323~341.
- Tchameni R, Mezger K, Nsifa N E, Poucllet A. 2001. Crustal origin of Early Proterozoic syenites in the Congo Craton (Ntem Complex), South Cameroon. *Lithos*, 57: 23~42.
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R and Compston W. 1996. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study. *Contribution Mineral Petrology*, 122(4): 337~358.
- Vavra G, Schmid R, Gebauer D. 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contribution Mineral Petrology*, 134: 380~404.
- Wu Yuanbao, Chen Daogong, Xia Qunke, Tu Xianglin, Cheng Hao. 2003. In-situ trace element analyses and Pb-Pb dating of zircons in granulite from Huangtuling, Dabieshan by LAM-ICP-MS. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(11): 1161~1170.
- Wu Yuanbao, Chen Daogong, Xia Qunke, Tu Xianglin, Cheng Hao. 2002. In-situ trace element analyses of zircons from Dabieshan Huangzhen eclogite: Trace element characteristics of eclogite-facies metamorphic zircon. *Chinese Science Bulletin*, 47(16): 1398~1401.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfeng. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554~1569.
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, Li Hhuiming, Liang Xinquan. 2002. U-Pb dating of early Mesozoic granodioritic intrusions in southeastern Hunan Province, South China and its petrogenetic implications. *Science in China (Series D)*, 45(3): 280~288.
- Watson E B and Harrison T M. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth. *Science*, 308(5723): 841~844.
- Watson E B, Wark D A and Thomas J B. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413~433.
- Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, Liu Xiaoming, Xu Ping and Sun Deyou. 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48(22): 2411~2421.
- Yuan Honglin, Gao Shang, Liu Xiaoming, Li Huiming Günther Detlef and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353~370.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, Zong Chunlei, Günther Detlef, Fontaine Gisela Helene, Liu Xiaoming, Diwu Chunrong. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1~2): 100~117.

LA-ICP-MS U-Pb Ages, Geochemical Characteristics of the Zircons from Wushanguan Complex Body in Anji Mining Area, Northwestern Zhejiang and Their Geological Significances

TANG Yanwen^{1,2)}, XIE Yuling¹⁾, LI Yingxu^{1,3)}, QIU Liming¹⁾, ZHANG Xinxin¹⁾,
HAN Yuda¹⁾, JIANG Yancen¹⁾

1) Civil and Environmental Engineering Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083;

2) State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,

Guiyang, 550002; 3) Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, 610082

Abstract: As the major granite intrusion in Anji mining area, Wushanguan complex body is composed by four rock units of biotite-monzonitic granite, granodiorite, moyite and fine-grained granite. Zircons from the first three units are analyzed by petrography, cathodoluminescence (CL) and LA-ICP-MS, and the results show that the complex body formed in Late Jurassic and Early Cretaceous, and biotite-monzonitic granite, granodiorite and moyite formed in $141.0 \pm 1.4\text{Ma}$ ($n = 13$, MSWD = 1.3), $138.1 \pm 1.0\text{Ma}$ ($n = 14$, MSWD = 0.92) and $137.0 \pm 1.8\text{Ma}$ ($n = 13$, MSWD = 1.9) respectively. That two inheritance zircons have been found, whose U-Pb ages are $518 \pm 9\text{Ma}$ and $624 \pm 9\text{Ma}$ respectively, suggests some old crustal materials of Early Caledonian and Late Jinningian were carried in magma by partial melting and (or) assimilation-contamination in the forming process of Wushanguan

complex body. The crystallization temperature of zircons in biotite-monzonitic granite, granodiorite and moyite are ranging from 628 ~ 747°C (with an average of 657°C), 625 ~ 715°C (with an average of 653°C) and 618 ~ 765°C (with an average of 698°C) respectively. The passive emplacement of the complex body, tensional and tenso-shear character of NW faults and regional tectonic setting indicate that Anji mining area had been under the extensional environment from 141 to 137Ma, and the diagenesis and mineralization events associated with the complex body are controlled by this setting. Analysis results and some evidences from geological investigation indicate in Anji mining area the polymetallic mineralization and the complex body have a close association in time and space. Anji polymetallic deposit (about 141 ~ 134Ma) and Tongshan Sn deposit (about 147 ~ 143Ma) in Zhejiang province indicate that another magmatic-mineralizing event had occurred during Late Jurassic-Early Cretaceous (about 148 ~ 134Ma) in East Qinzhou-Hangzhou metallogenic belts.

Key words: northwestern Zhejiang; Wushanguan complex body; Zircon U-Pb dating; Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt; tectonic setting; diagenetic and metallogenic epoch

第七届世界华人地质科学研讨会在成都举行

为促进海峡两岸三地及世界华人地质学家之间的学术交流,提高世界华人地质学家的学术水平和凝聚力,促进国内外学术交流水平,提高华人地质学家的国际话语权和国际影响力。自1999年中国地质学会联合世界各地华人地质学组织召开了第一届两岸三地及世界华人地质科学讨论会以来,已分别在美国旧金山、中国香港、台北、南京、赤峰等地召开六届。

第七届世界华人地质科学研讨会于2013年6月14~15日在成都理工大学顺利召开。出席大会的中国地质学会常务副理事长、前中国地质调查局局长孟宪来,前国土资源部总工程师、前中国地质调查局副局长、国务院参事张洪涛,中国地质科学院党委书记、副院长王小烈,中国地质学会秘书长、中国地质科学院常务副院长朱立新,中国地质学会常务理事、中国地质科学院副院长董树文,成都理工大学校长倪师军,成都理工大学副校长黄润秋、刘树根,中国科学院院士李廷栋、许志琴、李曙光等来自世界各地的近300位华人地质学家。

开幕式上,孟宪来常务副理事长代表大陆地质工作者向港澳台和海外华人地质学家表示热烈的欢迎;并在致辞中提出三点希望:一是希望世界华人地质学家能更加紧密地团结起来,加大学术交流的力度,破解地学难题,全面提高华人地质学家的学术水平和能力,树立华人地质学家在世界上的良好形象;二是希望新一代华人地质学家要像老一辈地质学家学习,把自己的聪明才智贡献给人民,积极主动地把世界上优秀的地学成果引进祖国,把祖国的先进地质成果介绍给世界,为民族振兴贡献力量;三是希望大陆的地质学家和海外的地质学家针对矿产资源短缺,自然灾害频发这些现象共同设立课题,共同开展研究,努力破解矿产资源短缺这一难题,努力减轻自然灾害对人类生命和财产带来的损失,做出当代地质学家应有的贡献。

美国密西根大学张有学教授代表海外华人、中国地球科学技术协会、中国地球科学促进会致辞,期望能进一步促进

海内外地质学家之间的学术交流,推动海内外华人地质学家之间的研究合作,期望中国地学教学与科研能尽早领先世界。

倪师军校长代表主办方致欢迎词,并表示做好服务,为大会提供周到的服务。

开幕式后,许志琴院士作了特邀报告《青藏高原——造山的高原》,作为中国构造地质学领域将微观构造与宏观构造研究相结合的开拓者,介绍了她对青藏高原的最新研究成果。青藏高原东缘—龙门山的隆升与四川盆地6000m的高差,但是GPS测量揭示龙门山在近代的缩短速率只有<3mm/a。为此,某些学者用“中下地壳隧道流”观点来揭示青藏高原隆升和汶川地震的发生机制。而许志琴院士团队通过新的横穿龙门山精细地震反射剖面及4口科学钻探井的岩芯研究,揭示了龙门山的深部结构为基底和盖层之间的滑脱和断坪—断坡逆冲的组合构造,上部为向东的逆冲叠覆构造。龙门山的隆升与中—下地壳隧道流无关。

张洪涛前总工程师报告了《青藏高原矿产勘查重大进展》,他领导的“青藏高原地质理论创新与找矿重大突破”项目荣获2011年度“科技进步奖”特等奖。自1999年国家实施“国土资源大调查”专项,率先开展青藏高原区域地质调查以来,全国100余个单位,每年上万人次,突破生命禁区,奋战雪域高原,以4km路线间距,拉网式穿越整个青藏高原,填制完成《青藏1:25万数字化地质图》,地质路线总长50万千米,面积220万平方千米,历时12年,获得了青藏高原碰撞、隆起演化等海量新数据,确认了21条蛇绿混杂岩带,解决了一大批重大地质难题,构建了特提斯演化新模型。

美国地质调查局周义明教授和美国伍兹霍尔海洋研究所林间教授也分别报告了《中国深海科学研究的展望与现代热液实验室的建立》以及《2008年汶川与2013年芦山地震的特征及关系》,向与会专家展示了海外华人地质学家的最新研究成果和前沿学术手段。

(下转第768页)