1000-0569/2012/028(10)-3241-54 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

长江中下游成矿带贵池抛刀岭金矿含矿岩体年代学及地球化学研究*

段留安[1,2] 杨晓勇[1]** 汪方跃[1] 邓江洪[1] 孙卫东[3]
DUAN LiuAn[1,2], YANG XiaoYong[1]**, WANG FangYue[1], DENG JiangHong[1] and SUN WeiDong[3]

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026
2. 武警黄金第七支队,烟台 264004
3. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室,广州 510640
1. *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026, *China*
2. *The 7th Gold Detachment of Chinese People's Armed Police Force, Yantai* 264004, *China*
3. *CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*
2012-05-21 收稿, 2012-08-23 改回.

Duan LA, Yang XY, Wang FY, Deng JH and Sun WD. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb age of ore-bearing porphyry in the Paodaoling gold deposit in Guichi, Middle-Lower Yangtze metallogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10):3241-3254

Abstract The Paodaoling gold deposit is the first discovered porphyry type gold deposit in Anqing-Guichi ore-cluster region in the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt (LYRB). The host rocks of the Paodaoling gold deposit are trachyte andesitic porphyries. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of two ore-bearing porphyries are 146.8 ± 2.4Ma and 141.3 ± 1.0Ma (2σ), according with the main mineralization time of LYRB. Whole rock geochemistry indicates that the ore-bearing porphyries are peraluminous, enriched in K-Rb-Pb and light REE, depleted in Nb-Ta-Ti, similar to crustal origination. These porphyries show volcanic arc granite affinities. The higher ratios of Ce^{4+}/Ce^{3+} and Eu_N/Eu_N^* calculated from zircon data indicate that the Paodaling intrusion has higher oxygen fugacity with potentiality for Au formation. We conjecture that the Paodaoling gold deposit was probably related to melting of mantle wedge during subduction between Paleo-Pacific plate and Izanagi plate.
Key words Paodaoling gold deposit; Trachyte andesitic porphyrie; Zircon U-Pb dating; Pacific plate subduction

摘 要 贵池抛刀岭金矿位于长江中下游成矿带安庆-贵池矿集区,是该地区首次发现的独立玢岩型金矿床,含矿岩体主要为蚀变矿化的英安玢岩。经过近两年的地质勘查,该矿床已接近大型金矿床规模。通过对抛刀岭金矿含矿岩体锆石 LA-ICPMS U-Pb 测定,其成岩年龄为 146.8 ± 2.4Ma 和 141.3 ± 1.0Ma (2σ),与长江中下游地区中生代大规模铜金成矿事件时间一致。全岩地球化学研究表明,该岩石为过铝质,富集大离子亲石元素(K、Rb、Pb),亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)和轻稀土富集等地球化学特征。较高的锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 和 Eu_N/Eu_N^* 显示抛刀岭含矿岩体具有较高的氧逸度特征。构造判别图解显示这套含矿岩石属火山弧花岗岩(VAG),与长江中下游铜金矿床含矿岩体形成于同一构造背景下,即太平洋俯冲作用引起的洋壳和地幔楔熔融形成。
关键词 抛刀岭金矿;英安玢岩;锆石 U-Pb 定年;太平洋板块俯冲
中图法分类号 P588.134; P597.3

1 引言

长江中下游成矿带是我国重要的铜金多金属成矿带之一,研究程度甚高(常印佛等,1991; 翟裕生等,1992;Pan and Dong, 1999; Mao *et al.*,2006; 毛景文等,2009),自西向东依次分布有鄂东、九瑞、安庆-贵池、庐枞、铜陵、宁芜和宁镇等 7 个矿集区(常印佛等,1991;Yang and Lee,2011; Deng *et al.*,

* 本文受中国科学院知识创新项目(KZCX1-YW-15-3)和国家自然科学基金项目(41173057、41090372、40921002)和安徽省公益性地质工作项目联合资助.
第一作者简介:段留安,男,1976 年生,博士生,工程师,矿产勘查及矿床地球化学专业
** **通讯作者**:杨晓勇,男,教授,矿床地球化学专业,E-mail: xyyang555@163.com

2011)。研究表明长江中下游铜金矿床主要成矿时代为140±5Ma (Mao *et al.*,2006; Xie *et al.*,2009; Sun *et al.*,2003),这些铜金多金属矿床主要与燕山期中酸性钙碱性侵入岩体有关(王强等,2004; Wang *et al.*, 2006, 2007; Xie *et al.*, 2009, 2012; Li *et al.*, 2009, 2010)。

贵池矿集区相对于长江中下游其他矿集区研究程度相对较低,除铜山铜矿研究程度较高外(俞沧海和袁小明,1999;俞沧海,2001;周曙光,2003;张智宇等, 2011),只有零星的研究(陈国光和应祥熙,2002;董胜,2006),这限制了对长江中下游岩浆与成矿系统特征全面理解。抛刀岭金矿床位于安庆-贵池矿集区(图1a)。该金矿目前处于勘察阶段,其金资源储量有望接近或达到大型规模,为贵池矿集区最大金矿床。该矿床含矿岩石主要为矿化英安玢岩(大于95%),其次为粉砂质碎裂岩。查清该区含矿英安玢岩成岩年龄,判定其成因类型,对该区乃至区域成矿研究和找矿实践都有重要借鉴意义。

2 区域地质背景

长江中下游地区位于扬子板块北缘,秦岭大别造山带和华北板块南侧,西起湖北鄂东,东至江苏镇江地区,全长约400km(图1a)。该区构造演化大体经历前寒武纪基底形成阶段,震旦纪-早二叠沉积覆盖阶段和中三叠以来的碰撞造山阶段(翟裕生等, 1992);随后进入太平洋构造域,发生大规模岩浆与地壳伸展活动(Gilder *et al.*,1991)。该地区中生代发生大规模的岩浆与成矿活动,是中国东部最重要的成矿带之一(常印佛等,1991)。

研究区抛刀岭金矿位于安庆-贵池矿集区。研究区出露地层从老至新为奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、白垩系及第四系,属扬子地层区之下扬子分区贵池小区,主要以海相为主的地台沉积,沉积厚度累计在3189~3358m。其中奥陶系为碳酸盐岩类,志留-泥盆系发育一套海相碎屑沉积;上二叠系下部为海陆交互的煤系,上-中部和三叠系仍以海相碳酸盐岩类为主(赵德奎等,2009)。

据物探、化探和遥感综合解译推测,本区处于近EW向的深大断裂和NNE向基底断裂的交汇部位(陈国光和应祥熙,2002)。区内断裂构造广泛发育,主要以NNE、NE及少数NW向断裂构造为主。断裂构造不仅控制了区域上沉积建造、盖层褶皱、断层及岩浆侵入、火山活动,而且控制了区域矿产的分布。安庆贵池地区中生代岩浆岩发育,主要有:青

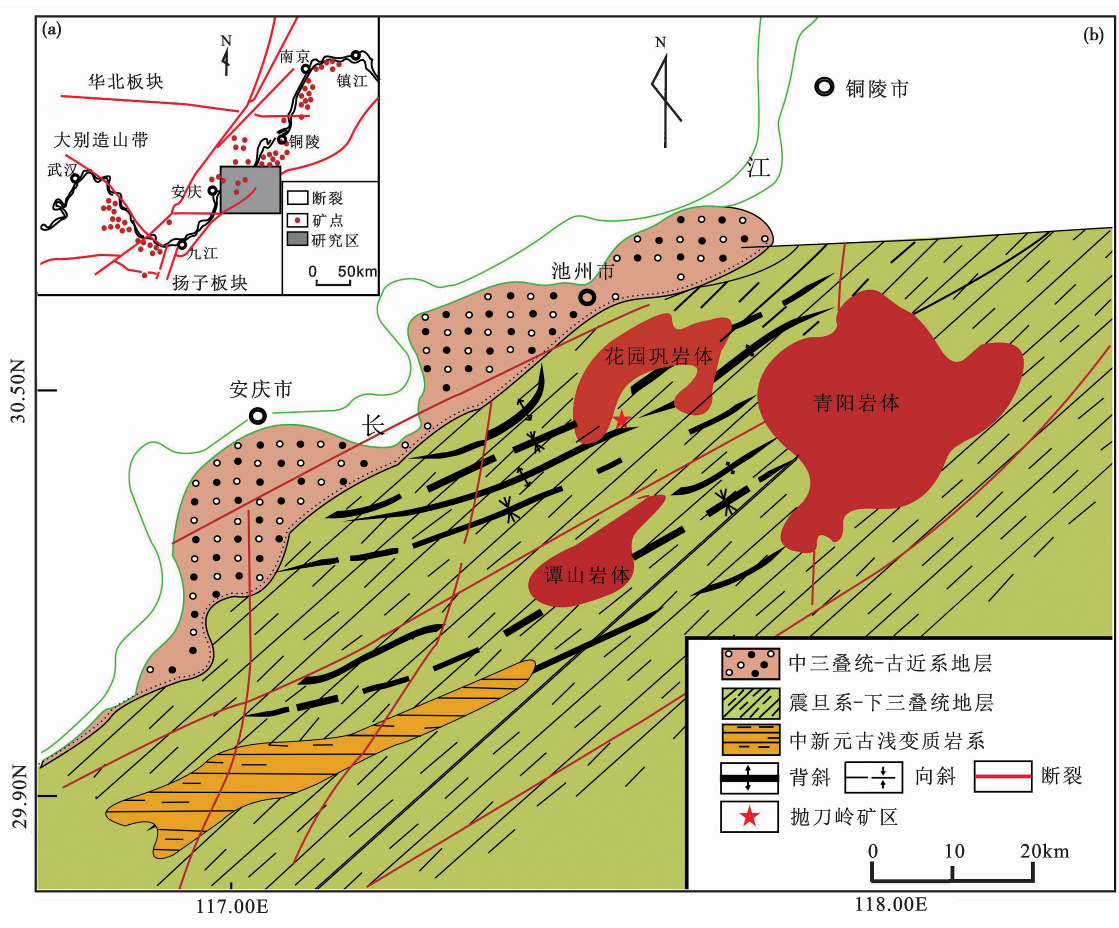

图1 抛刀岭及周边地区地质简图(据田鹏飞等, 2012修改)

Fig. 1 Sketch map of the Paodaoling district, Anqing-Guichi region (after Tian *et al.*,2012)

阳岩体（$750km^2$，139～142Ma）、谭山岩体（$140km^2$，129～133Ma）、花园巩岩体（$220km^2$，131Ma）（Wu *et al.*，2012）。花园巩岩体为A型钾长花岗岩（邢凤鸣和徐祥，1995；Wu *et al.*，2012），分布于抛刀岭金矿的北侧（图1b、图2）。

3 矿床地质及岩相特征

矿区位于自来山背斜之北西翼，岩层倾向NW，倾角45°～55°。出露地层主要为志留系高家边组（S_1g），其次为坟头组（S_2f）和茅山组（S_3m），岩性主要为粉砂质页岩、砂岩、砂质页岩等（图2）。

区内断裂构造比较发育，以NE向为主，是主要控岩、控矿构造，主要有F1、F2、F3三条。F1断裂贯穿全区走向NE35°，倾向NW，倾角70°～78°，控制着含矿岩体的西部边界；F3断裂早期为压扭性，后期表现为张性，沿断裂带发育有3～7m宽的角砾岩，为含矿岩体的东部边界。NW向断裂规模较小。区内岩浆岩受F1和F3断裂构造控制，呈带状分布于其间，出露面积约$0.6km^2$，为浅成次火山岩。该岩体是金矿体赋存的主要围岩，普遍发育绢云母化、黄铁矿化和硅化等，与金矿化关系密切。

含矿岩体主要矿物成分：斑晶含量20%～35%，少数可达50%左右，主要为斜长石，少量黑云母、普通角闪石、石英，大部分斑晶已经碳酸盐化和绿泥石化（图3）。斜长石：自形晶，板状，粒径0.25～2.5mm，聚片双晶发育，可见卡钠符合双晶，An＝24～42，为更-中长石（图3c）。部分晶粒蚀变为绢云母（图3d）。石英一般3%～8%，黑云母3%～10%，黑云母斑晶与斜长石斑晶具互为消长的关系。石英大多呈溶蚀的卵圆形或港湾状外貌，有的保留高温石英的假像（图3f）。基质为变余霏细结构，少量包含霏细结构，主要有微晶斜长石、石英、钾长石，少量黑云母、角闪石、微量榍石、磷灰石、锆石等组成。金属矿物主要有黄铁矿、少量毒砂等组成。黄铁矿：浅铜黄色，自形晶，多数晶粒呈五角十二面体晶型，少数为立方体晶型，粒径0.025～0.45mm，呈浸染状分布（图3h）。根据镜下分析，抛刀岭金矿含矿岩石为浅成英安玢岩。

含矿岩石以英安玢岩型（包含英安玢岩质角砾岩）为主，约占总量的95%，粉砂质碎裂岩占型少量。矿石矿物成份主要有黄铁矿，其次为毒砂、褐铁矿、赤铁矿、胶黄铁矿，闪锌矿、脆硫锑铅矿，白铁矿少量，方铅矿、黄铜矿微量，偶见蹄金银矿。

4 样品与测试

因采集样品时应避免采集无或者少量蚀变样品，本次在

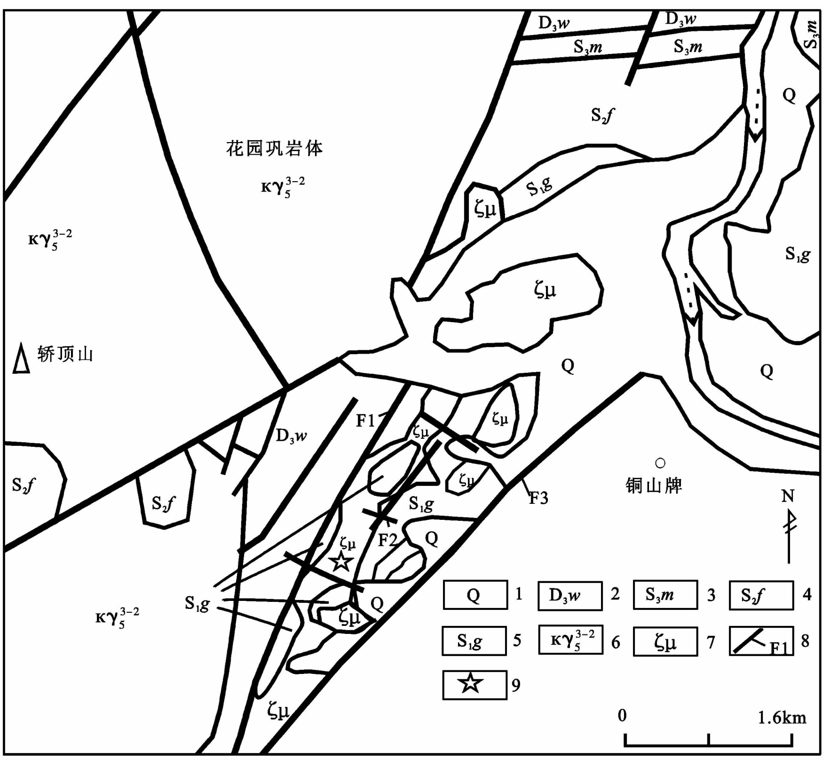

图2 抛刀岭金矿地质简图

1-第四系；2-五通组石英砾岩、砂岩；3-茅山组粉砂岩夹页岩；4-坟头组砂质页岩；5-高家边组；6-钾长花岗岩；7-英安玢岩；8-断层；9-采样位置

Fig. 2 Sketch map of the Paodaoling gold deposit

1-Quaternary System; 2-quartz conglomerate, sandstone of Wutong Formation; 3-silty sandstone and shale of Maoshan Formation; 4-sandy shale of Fentou Formation; 5-Gaojiabian Formation; 6-potassic granite; 7-trachyte andesitic porphyries; 8-fault; 9-sampling location

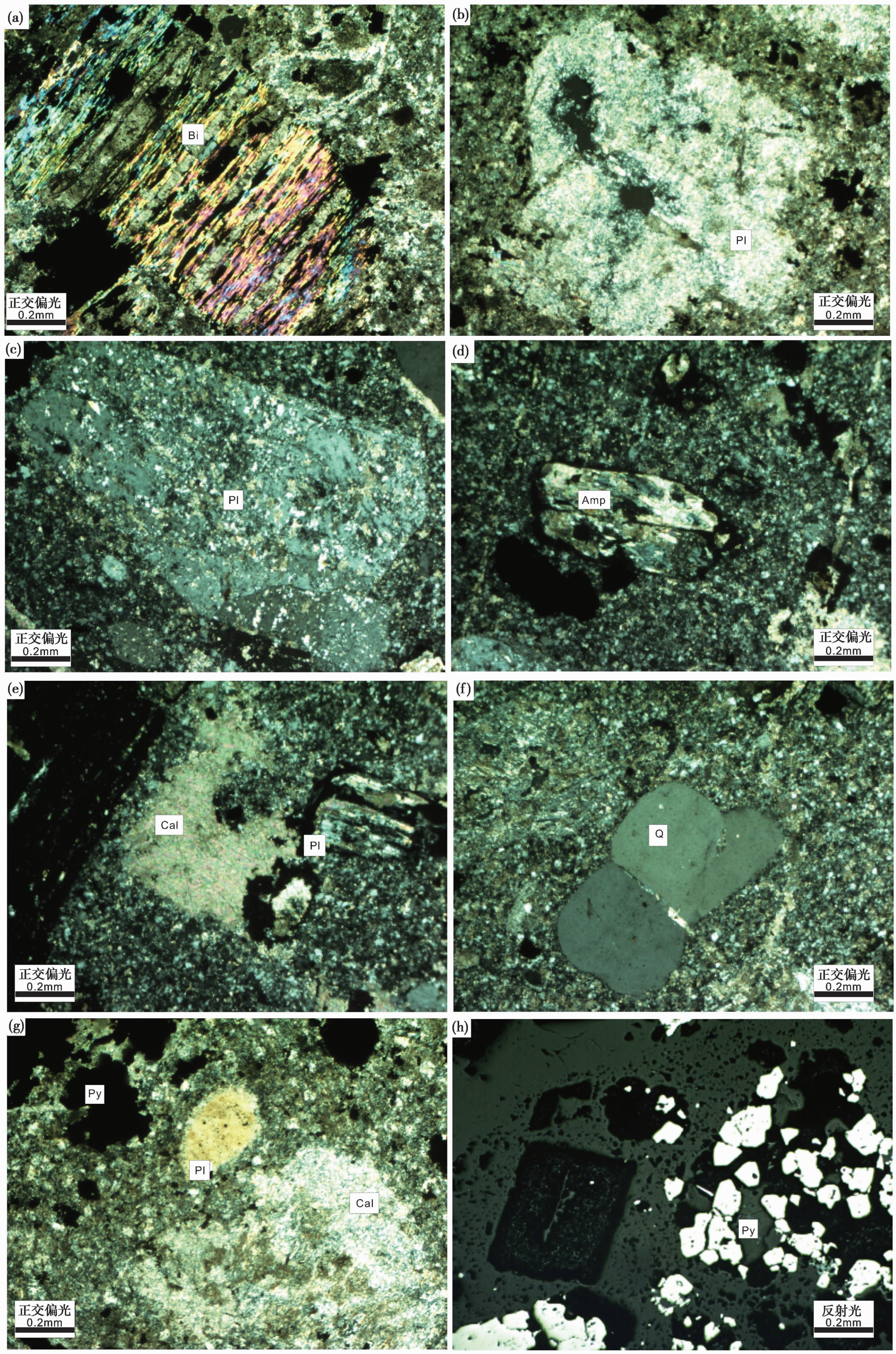

图3 抛刀岭金矿含矿英安玢岩镜下照片

Pl-斜长石；Py-黄铁矿；Bi-黑云母；Cal-方解石；Amp-角闪石；Q-石英

Fig. 3 Micrograph of the Paodaoling trachyte andicitic porphyrite

Pl-plagioclase; Py-pyrite; Bi-biotite; Cal-calcite; Amp-hornblende; Q-quartz

抛刀岭金矿区只采集 6 件较新鲜岩石样品进行全岩地球化学分析。由于岩体全岩蚀变矿化，虽尽量采集无或少蚀变的样品，但镜下观察仍然发现大量矿物发生蚀变作用。所有采集样品统一编号后送至澳实矿物实验室（广州），由该实验室对样品进行主、微量元素的分析测定，其中常量元素采用 ME-XRF06 法，由 X 荧光光谱仪测定；稀土元素采用 ME-MS81 法，由等离子体质谱测定；微量元素采用 ME-MS61 法，由等离子体质谱测定，具体分析流程见 Qi *et al*.（2000）。

英安玢岩锆石单矿物挑选由河北廊坊地质矿产研究所实验室完成。锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素定年在中国科学院地球化学研究所（广州）同位素地质年代学与地球化学重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005，ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度，二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流（Ar + He）中加入了少量氮气，以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度（Hu *et al*.，2008）。每个时间分辨分析数据包括大约 20 ~ 30s 的空白信号和 50s 的样品信号。对分析数据的离线处理（包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算）采用软件 ICPMS DataCal（Liu *et al*.，2008，2010a）完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al*.（2008，2010a）。

锆石微量元素含量利用多个 USGS 参考玻璃（BCR-2G，BIR-1G）作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算（Liu *et al*.，2010a）。这些 USGS 玻璃中元素含量的推荐值据 GeoReM 数据库（http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/）。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正，每分析 5 个样品点，分析 2 次 91500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移，利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正（Liu *et al*.，2010a）。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck *et al*.，（1995）。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3（Ludwig，2003）完成。

5 测试结果

5.1 岩石地球化学特征

岩石主微量分析结果见表 1。鉴于 PDL-2-3 样品极高的 Fe_2O_3 含量和烧失量（严重的黄铁矿化），该样分析结果仅作参考。

抛刀岭含矿玢岩具集中的 SiO_2（64.29% ~ 68.86%，平均为 66.34%）、Al_2O_3（14.16% ~ 15.65%，平均为 14.93%）和 Fe_2O_3（5.61% ~ 7.06%，平均为 6.48%）含量；$K_2O + Na_2O$ 为 3.71% ~ 4.41%，平均为 4.14%；TiO_2 为 0.73% ~ 1.07%，平均为 0.86%；较低的 MgO（0.67% ~ 0.76%，平均 0.73%）、$Mg^{\#}$（16.7 ~ 20.9，平均为 18.4）、CaO（0.01% ~ 0.07%，平均为 0.03%）含量。岩石总体有表现为富硅、铝、钾，贫钠、碱、钙、镁的特征。由于抛刀岭岩体受后期热液蚀变作用较大，如斜长石蚀变，绢云母化，钾化，全岩具有较高的烧失量（5.01% ~ 10.05%）（表 1）。因此在判别岩石性质时不能用受后期热液作用影响较大的元素，而是采用不活动性元素来进行判别。在 $Zr/TiO_2 \times 0.0001$-Nb/Y 岩石判别图解中（图 4a），样品落入粗面安山岩与碱性玄武岩区域内。在 SiO_2 对 K_2O 的判别图上，岩石总体为高钾钙碱性系列（图 4b）。结合矿物斑晶组成（斜长石、角闪石、黑云母等矿物）抛刀岭含矿岩石可定名为英安玢岩。活动元素的含量也进一步显示，抛刀岭英安玢岩可能受到严重的钾化而导致贫 Ca、Na、Sr、Ba 等地球化学特征（如斜长石绢云母化、绿泥石化等，图 3b，c）。

微量元素上，抛刀岭金矿含矿玢岩显示贫 Sr（$31.2 \times 10^{-6} \sim 59.3 \times 10^{-6}$）富 Y（$16.0 \times 10^{-6} \sim 27.3 \times 10^{-6}$）和 Yb（$1.50 \times 10^{-6} \sim 2.97 \times 10^{-6}$）。稀土元素球粒陨石标准化的稀土配分曲线（图 5a）所示，样品具有相似的分布模式，且与地壳稀土元素一致，为右倾的平滑曲线。花岗闪长玢岩的 $\sum REE = 101.8 \times 10^{-6} \sim 174.1 \times 10^{-6}$，平均为 143.0×10^{-6}，$(La/Yb)_N = 6.49 \sim 17.32$，平均为 10.33，$\delta Eu$ 为 0.74 ~ 0.95，平均为 0.83，，显示其经历不同程度的斜长石结晶分离作用。在微量元素原始地幔标准化图解中（图 5b），显示明显的 K、Pb、Th、U 等大离子亲石元素富集（除 Sr 和 Ba 相对于地壳有负异常），亏损 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等高场强元素。虽然抛刀岭岩体受到后期的热液蚀变作用可能引起活动性元素的富集或亏损（如 K、Pb、Th、Sr、Ba），但是高场强元素一般不受到影响。抛刀岭英安玢岩表现出 Nb、Ta 负异常，与平均地壳和岛弧火山岩显示相似的微量元素配分特征，而与 N-MORB 有明显差异，指示其元素有一定的陆壳物质的加入，岩石的 Nb/Ta（13 ~ 14）也和典型的壳源岩浆比较接近。

5.2 锆石 U-Pb 定年

锆石 U-Pb 同位素、稀土元素数据见表 2 和表 3。PDL-1 样品 15 颗锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 146.8 ± 2.4Ma（2σ）；样品 PDL-2 锆石 Th/U 比值范围为 0.28 ~ 0.55，平均 0.38；PDL-2 样品锆石几乎都落在协和线之上（图 6a），表明锆石受后期热液流体作用影响较小，能更好的反映岩浆的结晶年龄。PDL-2 样品 21 颗锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 141.3 ± 1.0Ma（2σ）（图 6c）。虽然 PDL-1 样品可能遭受了后期的 Pb 丢失事件，但是与年龄数据较好的 PDL-2 样品在误差范围内显示一致的年龄，表明抛刀岭金矿含矿英安玢岩的成岩年龄为 141 ~ 146Ma，为晚侏罗-早白垩世（燕山期）形成。其中两件样品共发现数颗捕获或残留锆石，没有显示集中的年龄范围，可能是原岩残留锆石或岩浆在侵位上升过程中捕获得到。

锆石稀土表现为轻稀土亏损、重稀土富集、明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常（图 6b，d）。这些特征表明本文所分析的锆石为典型的岩浆成因锆石。样品 PDL-1 锆石 Th/U 为 0.31 ~

表 1 抛刀岭金矿英安玢岩全岩主量(wt%)和微量($\times10^{-6}$)数据

Table 1 Results of major (wt%) and trace ($\times10^{-6}$) elements of Paodaoling ore-bearing trachyandensitic porphyries

样品号	PDL2-1	PDL2-2	PDL2-3	PDL3-1	PDL3-2	PDL3-3
岩性	安山玢岩	安山玢岩	黄铁矿化玢岩	安山玢岩	安山玢岩	安山玢岩
SiO_2	68.86	67.43	55.98	64.29	65.61	65.51
TiO_2	0.69	0.69	0.83	0.94	0.95	1.01
Al_2O_3	14.16	14.5	12.66	15.63	15.65	14.73
$Fe_2O_3^T$	5.61	6.68	14.83	7.06	6.38	6.68
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MgO	0.74	0.71	0.66	0.76	0.75	0.67
CaO	0.01	0.01	0.01	0.04	0.05	0.07
Na_2O	0.13	0.13	0.16	0.14	0.13	0.16
K_2O	4.01	4.07	3.55	4.18	4.28	3.92
P_2O_5	0.032	0.028	0.08	0.161	0.152	0.174
Cr_2O_3	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	5.01	5.47	10.05	5.63	5.74	5.77
$Mg^{\#}$	20.9	17.5	8.2	17.7	19.0	16.7
V	93	89	110	144	140	153
Cu	31	32	45	36	29	26
Zn	24	23	1490	422	243	148
Cr	60	60	40	40	40	50
Co	12.3	12.9	19.4	17	17.9	18.3
Ni	17	21	19	15	16	17
Ga	20.8	20.2	18.8	20.6	21.1	20.2
Cs	8.37	8.31	4.98	11.95	11.8	10.6
Rb	186	183	159	229	239	220
Ba	185	169	230	130	135	435
Th	7.05	6.77	5	6.43	6.62	5.83
U	2	2.1	1.51	2.12	2.07	1.98
Nb	15.3	16.5	11.7	18.7	18.9	17.6
Ta	1.2	1.3	0.9	1.4	1.4	1.3
La	36.2	28.8	21.4	26.8	27.4	27.4
Ce	71.7	56.1	39.9	55.7	57.8	57
Pb	102	116	1360	106	71	23
Pr	8.06	6.58	4.69	7.18	7.35	7.22
Sr	31.8	18.2	11.3	59.3	53	44.8
Nd	29.2	23.3	16.4	27	28	28.4
Zr	162	172	142	195	202	177

样品号	PDL2-1	PDL2-2	PDL2-3	PDL3-1	PDL3-2	PDL3-3
岩性	安山玢岩	安山玢岩	黄铁矿化玢岩	安山玢岩	安山玢岩	安山玢岩
Hf	4.6	4.7	3.8	5.2	5.2	4.8
Sm	4.96	4.43	3.18	5.88	5.75	6.23
Eu	1.16	1.05	0.61	1.63	1.58	2.03
Gd	4.64	4.19	3.13	5.63	5.69	6.82
Tb	0.63	0.66	0.45	1.01	0.98	1.17
Dy	3.25	3.17	2.24	5.16	5.05	5.68
Y	17.7	16	11.7	27.3	26.7	24.5
Ho	0.63	0.62	0.48	1.09	1.07	1.14
Er	1.78	1.77	1.45	3.15	3.03	3.23
Tm	0.23	0.23	0.22	0.42	0.42	0.44
Yb	1.50	1.53	1.48	2.96	2.79	2.73
Lu	0.24	0.24	0.24	0.44	0.43	0.43
La	36.2	28.8	21.4	26.8	27.4	27.4
Ce	71.7	56.1	39.9	55.7	57.8	57
Pr	8.06	6.58	4.69	7.18	7.35	7.22
Nd	29.2	23.3	16.4	27	28	28.4
Sm	4.96	4.43	3.18	5.88	5.75	6.23
Eu	1.16	1.05	0.61	1.63	1.58	2.03
Gd	4.64	4.19	3.13	5.63	5.69	6.82
Tb	0.63	0.66	0.45	1.01	0.98	1.17
Dy	3.25	3.17	2.24	5.16	5.05	5.68
Ho	0.63	0.62	0.48	1.09	1.07	1.14
Er	1.78	1.77	1.45	3.15	3.03	3.23
Tm	0.23	0.23	0.22	0.42	0.42	0.44
Yb	1.5	1.53	1.48	2.96	2.79	2.73
Lu	0.24	0.24	0.24	0.44	0.43	0.43
Y	17.7	16	11.7	27.3	26.7	24.5
ΣREE	164.2	132.7	95.9	144.1	147.3	149.9
LREE	151.3	120.3	86.2	124.2	127.9	128.3
HREE	12.9	12.41	9.69	19.86	19.46	21.64
LREE/HREE	11.73	9.69	8.89	6.25	6.57	5.93
$(La/Yb)_N$	17.31	13.50	10.37	6.49	7.04	7.20
δEu	0.74	0.75	0.59	0.87	0.84	0.95

0.86,平均为0.55,U-Pb协和线分析表明大部分样品落在协和线右侧,可能表示该样品受到后期热液蚀变导致铅丢失。

5.3 锆石稀土元素特征

抛刀岭锆石稀土∑REE为$230.3\times10^{-6}\sim1028\times10^{-6}$。球粒陨石标准化图解上表现为轻稀土亏损,重稀土富集,Ce正异常和Eu负异常典型的岩浆成因特征。两件抛刀岭锆石Ce^{4+}/Ce^{3+}变化范围分别为66.80~472.9,171.2~1299;Eu_N/Eu_N^*变化范围为0.46~0.65,0.50~0.85。与智利地区岩浆岩对比,两件抛刀岭锆石较高的Ce^{4+}/Ce^{3+}和Eu_N/Eu_N^*特征,落在含矿岩石变化范围内,显示较高的氧逸度特征(图7)。

6 讨论

6.1 成矿年代学

长江中下游地区中生代岩浆作用强烈,并发生大规模的

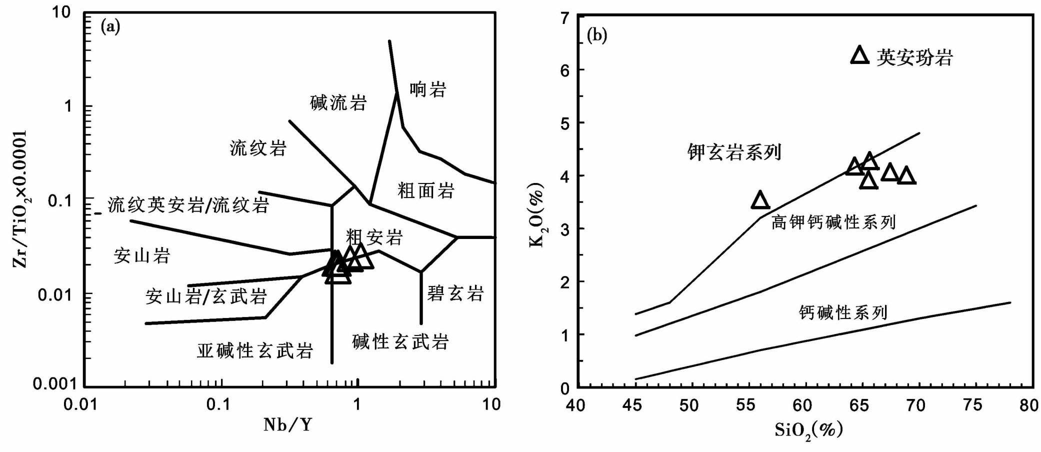

图 4 抛刀岭金矿含矿岩石地球化学判别图解

(a)-全岩 $Zr/TiO_2 \times 0.0001$-Nb/Y 判别图解(据 Winchester and Floyd, 1976);(b)-岩石系列 SiO_2-K_2O 图解(据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 4 Discrimination diagrams of gold-bearing rocks in the Paodaoling gold deposit

(a)-whole-rock $Zr/TiO_2 \times 0.0001$ vs. SiO_2 diagram (after Winchester and Floyd, 1976); (b)-SiO_2 vs. K_2O diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976)

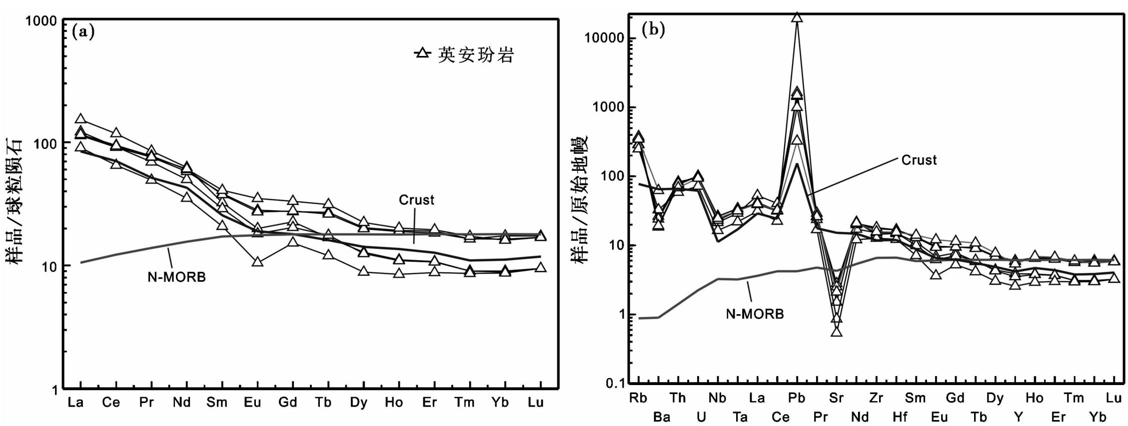

图 5 抛刀岭金矿英安玢岩稀土元素配分图(a)及微量元素蛛网图(b)(球粒陨石标准值据 Sun and McDonough, 1989; 原始地幔及其他地质储库标准值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 5 REE chondrite normalized diagram (a) and trace elements primitive normalized diagram (b) of the Paodaoling trachyte andicitic porphyrites (normalization values after Sun and McDonough, 1989; McDonough and Sun, 1995)

Cu-Au-Fe 成矿作用。长江中下游地区在中生代岩浆形成时间可以分为两段:145 ~ 136Ma, 131 ~ 124Ma(周涛发等, 2008),并具有分区性和演化趋势(Zhou *et al.*, 2008),其中与铜金矿有关的岩体主要形成时代为 140 ± 5Ma,而 130 ~ 120Ma 的岩浆活动主要为双峰式火山岩加 A 型花岗岩组合(Li *et al.*, 2011, 2012),发育大型铁矿,如著名的宁芜铁矿矿集区,以及庐枞盆地的泥河铁矿和罗河铁矿。

抛刀岭金矿含矿玢岩主要形成于 146 ~ 141Ma,与长江中下游早期岩浆活动相对应,因此我们有理由相信抛刀岭金矿的成矿时代也可以与长江中下游铜金成矿的主体时代类比,形成于晚侏罗-早白垩世。同时,其东南部铜山岩体年龄 145.1 ± 1.2Ma(张智宇等, 2011)也表明,贵池矿集区的铜金矿床可以和长江中下游其他地区铜金矿床进行类比。

6.2 抛刀岭含矿玢岩成因与成矿背景

抛刀岭含矿玢岩形成时代与岩体产出状态都可以与长江中下游早期岩浆活动进行类比。目前对于长江中下游 146 ~135Ma 含矿岩体都表现为高 Sr 低 Yb 等埃达克质特征。对于这些埃达克岩浆岩成因主要有:(1)由壳幔物质相互作用的产物(陶奎元等,1998;陈江峰和江博明,1999;杜杨松等,2004,2007;谢建成等,2012;Li *et al.*, 2009;Xie *et al.*, 2008, 2011),是富集岩石圈地幔部分熔融产生的玄武质岩浆经过与地壳岩石同化混染后又经过分离结晶作用形成;(2)拆沉或加厚下地壳物质部分熔融的产物(许继峰等,

表 2 抛刀岭金矿锆石 U-Pb 年龄数据

Table 2 Zircon U-Pb age of Paodaoling gold deposit

Spot No.	Th ($\times10^{-6}$)	U ($\times10^{-6}$)	Th/U	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$(Ma)	1σ
样品号 PDL-1									
PDL-1-01	217	372	0.6	0.15990	0.01011	0.02199	0.00035	140.2	2.2
PDL-1-02	135	157	0.9	3.33287	0.11593	0.25201	0.00452	1448.8	23.3
PDL-1-03	143	308	0.5	0.15048	0.00919	0.02202	0.00037	140.4	2.3
PDL-1-04	221	399	0.6	0.44541	0.02244	0.06073	0.00111	380.1	6.8
PDL-1-05	67	139	0.5	0.68034	0.03885	0.03601	0.00100	228.0	6.2
PDL-1-06	119	380	0.3	0.19123	0.01077	0.02673	0.00049	170.1	3.1
PDL-1-07	107	257	0.4	1.38712	0.06467	0.03383	0.00056	214.5	3.5
PDL-1-08	200	351	0.6	0.17096	0.01255	0.02403	0.00043	153.1	2.7
PDL-1-09	148	299	0.5	1.93395	0.10204	0.03910	0.00082	247.3	5.1
PDL-1-10	179	260	0.7	0.21590	0.01341	0.02348	0.00043	149.6	2.7
PDL-1-11	106	257	0.4	0.37549	0.02780	0.02432	0.00055	154.9	3.5
PDL-1-12	267	553	0.5	0.92976	0.03002	0.09285	0.00148	572.4	8.7
PDL-1-13	225	305	0.7	0.23707	0.01262	0.02355	0.00040	150.0	2.5
PDL-1-14	180	325	0.6	0.15301	0.00914	0.02227	0.00035	142.0	2.2
PDL-1-15	163	325	0.5	0.33816	0.01957	0.02383	0.00044	151.8	2.8
PDL-1-16	49	158	0.3	0.33330	0.02413	0.02285	0.00047	145.7	2.9
PDL-1-17	113	175	0.6	0.31086	0.01791	0.02364	0.00047	150.6	2.9
PDL-1-18	90	252	0.4	0.17998	0.01125	0.02320	0.00038	147.9	2.4
PDL-1-19	186	304	0.6	0.81659	0.02798	0.06759	0.00199	421.6	12.0
PDL-1-20	188	287	0.7	0.32633	0.01750	0.02387	0.00032	152.0	2.0
PDL-1-21	97	223	0.4	1.15116	0.05883	0.03028	0.00065	192.3	4.0
PDL-1-22	151	337	0.4	0.17232	0.00926	0.02274	0.00031	145.0	2.0
PDL-1-23	295	458	0.6	0.36992	0.01650	0.02471	0.00035	157.3	2.2
PDL-1-24	142	316	0.4	1.40005	0.15072	0.03242	0.00114	205.7	7.1
PDL-1-25	144	268	0.5	0.30327	0.01847	0.02335	0.00048	148.8	3.0
PDL-1-26	130	270	0.5	0.40033	0.02525	0.02442	0.00049	155.6	3.1
PDL-1-27	173	358	0.5	0.20270	0.01157	0.02249	0.00033	143.4	2.1
PDL-1-28	202	305	0.7	0.41480	0.02906	0.02571	0.00038	163.7	2.4
PDL-1-29	257	349	0.7	0.60834	0.04017	0.02745	0.00042	174.6	2.7
PDL-1-30	220	307	0.7	0.25823	0.01312	0.02333	0.00037	148.7	2.4
样品号 PDL-2									
PDL-2-01	60	219	0.3	0.1765	0.0110	0.0219	0.0004	139.4	2.5
PDL-2-02	68	227	0.3	0.1812	0.0108	0.0222	0.0004	141.7	2.6
PDL-2-03	86	205	0.4	0.1728	0.0109	0.0225	0.0004	143.2	2.8
PDL-2-04	66	218	0.3	0.1642	0.0107	0.0226	0.0004	144.1	2.6
PDL-2-05	85	211	0.4	0.1636	0.0101	0.0217	0.0005	138.4	3.1
PDL-2-06	137	283	0.5	0.3495	0.0272	0.0354	0.0015	224.0	9.6
PDL-2-07	106	259	0.4	0.1434	0.0098	0.0221	0.0004	140.9	2.7
PDL-2-08	71	143	0.5	0.2122	0.0144	0.0226	0.0005	143.8	3.3
PDL-2-09	77	223	0.3	0.1689	0.0095	0.0226	0.0004	143.8	2.7
PDL-2-10	72	242	0.3	0.8852	0.0307	0.0636	0.0010	397.5	6.2
PDL-2-11	106	235	0.4	1.3567	0.0456	0.1321	0.0020	799.8	11.6
PDL-2-12	62	217	0.3	0.1770	0.0109	0.0218	0.0004	138.9	2.3
PDL-2-13	88	260	0.3	0.1657	0.0103	0.0226	0.0003	143.8	2.2
PDL-2-14	50	168	0.3	0.1791	0.0130	0.0220	0.0004	140.5	2.7
PDL-2-15	106	259	0.4	0.2344	0.0125	0.0235	0.0004	149.9	2.8
PDL-2-16	84	227	0.4	0.6797	0.0319	0.0521	0.0016	327.5	10.0

续表 2
Continued Table 2

Spot No.	Th (×10⁻⁶)	U (×10⁻⁶)	Th/U	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$ (Ma)	1σ
PDL-2-17	63	181	0. 3	0. 1700	0. 0116	0. 0222	0. 0004	141. 2	2. 8
PDL-2-18	171	413	0. 4	0. 1508	0. 0072	0. 0221	0. 0003	140. 7	1. 8
PDL-2-19	41	135	0. 3	0. 2695	0. 0601	0. 0231	0. 0005	147. 5	3. 1
PDL-2-20	170	205	0. 8	1. 1358	0. 0349	0. 1206	0. 0016	734. 3	9. 3
PDL-2-21	105	259	0. 4	0. 1751	0. 0102	0. 0217	0. 0003	138. 6	2. 0
PDL-2-22	108	344	0. 3	0. 1654	0. 0095	0. 0217	0. 0003	138. 2	2. 0
PDL-2-23	119	155	0. 8	7. 0316	0. 2268	0. 3104	0. 0057	1742. 6	28. 0
PDL-2-24	148	338	0. 4	0. 1578	0. 0100	0. 0222	0. 0003	141. 7	2. 2
PDL-2-25	93	271	0. 3	0. 1549	0. 0108	0. 0222	0. 0004	141. 7	2. 5
PDL-2-26	79	211	0. 4	0. 1977	0. 0128	0. 0220	0. 0004	140. 3	2. 7
PDL-2-27	151	277	0. 5	0. 1703	0. 0116	0. 0221	0. 0004	140. 9	2. 4
PDL-2-28	105	233	0. 5	0. 1890	0. 0103	0. 0229	0. 0005	146. 1	2. 9
PDL-2-29	141	293	0. 5	0. 1805	0. 0127	0. 0233	0. 0005	148. 2	3. 0
PDL-2-30	140	307	0. 5	0. 1566	0. 0113	0. 0220	0. 0004	140. 2	2. 4

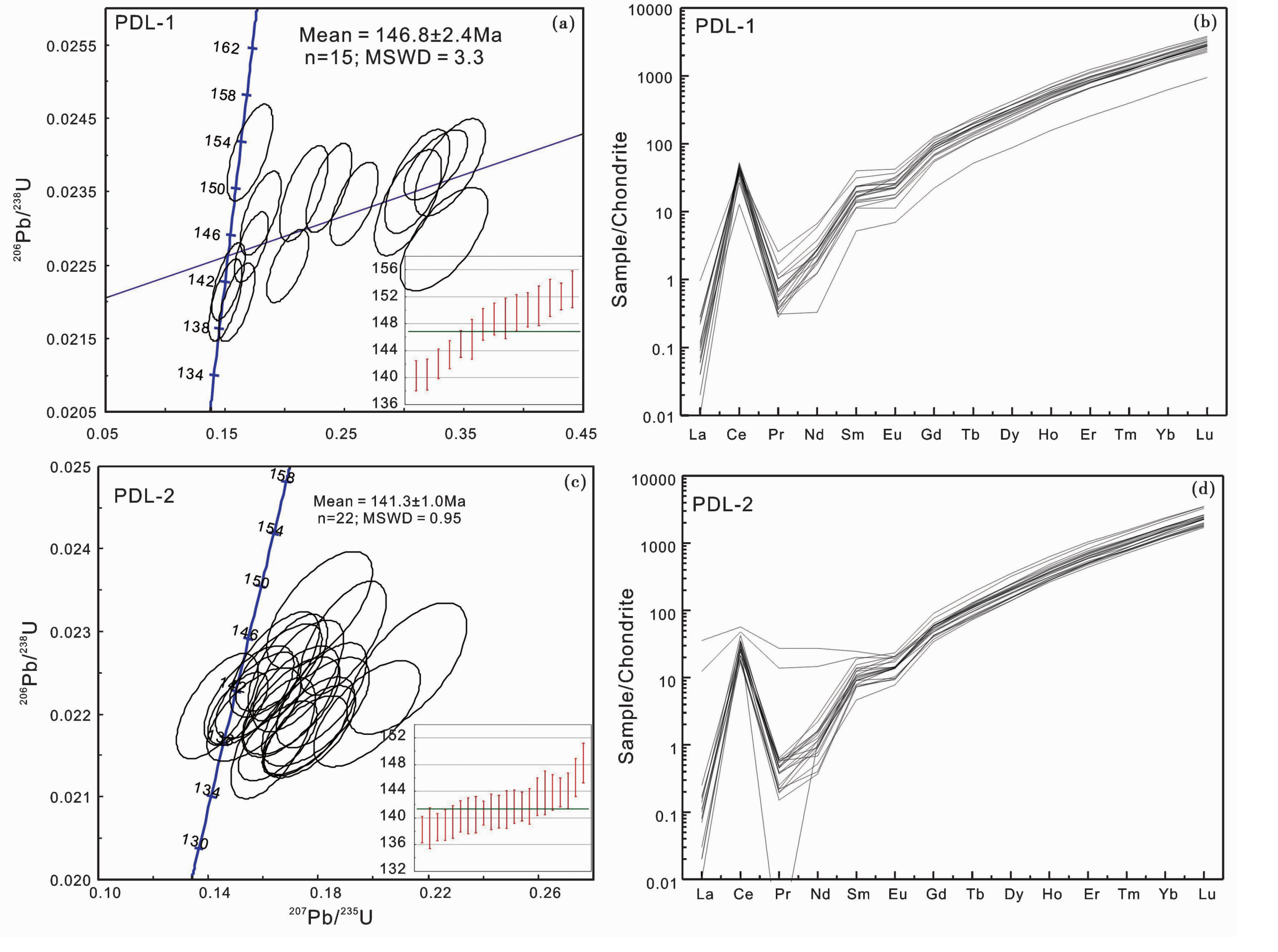

图 6 抛刀岭金矿英安玢岩锆石年龄图(a, c)及锆石稀土配分图解(b, d,粒陨石标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Zircon U-Pb ages (a, c) and REE distribution patterns (b, d) of zircons from the porphyrites in the Paodaoling gold deposit (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

表3 抛刀岭金矿锆石稀土元素含量($\times10^{-6}$)

Table 3 Zircon REE elements content of Paodaoling gold deposit ($\times10^{-6}$)

Spot No.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑REE	Ce^{4+}/Ce^{3+}	Eu_N/Eu_N^*
样品号 PDL-1																	
PDL-1-01	0.05	27.22	0.07	1.27	2.07	0.94	13.53	4.81	58.52	23.65	111.15	25.67	263.25	56.96	589.2	391.8	0.54
PDL-1-03	0.03	23.62	0.04	0.78	2.15	1.04	14.38	5.34	68.29	27.30	132.93	31.28	320.76	71.28	699.2	391.9	0.57
PDL-1-08	0.02	27.61	0.10	1.03	2.52	1.28	16.23	6.48	78.91	32.11	154.20	35.13	366.09	81.47	803.2	383.1	0.61
PDL-1-10	0.23	22.53	0.24	3.11	4.83	2.14	23.17	7.27	83.39	31.39	144.30	31.75	320.41	69.69	744.5	75.7	0.62
PDL-1-13	0.00	29.21	0.16	2.75	6.12	2.46	26.03	8.40	94.84	35.81	162.51	36.56	356.45	75.69	837.0	66.8	0.60
PDL-1-14	0.06	26.80	0.11	1.78	3.66	1.49	19.49	6.48	75.33	29.64	137.97	31.40	324.17	72.47	730.8	162.2	0.54
PDL-1-15	0.07	24.53	0.06	0.87	2.57	1.32	17.91	6.53	83.33	33.49	158.93	36.17	365.96	80.03	811.8	318.7	0.60
PDL-1-16	0.02	7.85	0.03	0.15	0.80	0.40	4.55	1.95	22.33	8.98	42.40	10.11	106.62	24.09	230.3	325.5	0.65
PDL-1-17	0.00	18.60	0.03	1.10	2.61	1.47	19.45	7.59	95.62	38.96	188.27	43.00	424.69	93.70	935.1	270.7	0.63
PDL-1-18	0.01	16.57	0.04	0.59	1.72	0.65	11.15	4.22	51.53	21.89	109.27	25.54	267.42	60.04	570.7	366.1	0.46
PDL-1-20	0.00	25.61	0.05	1.29	3.07	1.32	19.19	6.69	84.63	33.20	162.73	37.15	375.54	83.79	834.3	247.6	0.53
PDL-1-22	0.00	21.57	0.03	0.86	1.77	0.92	11.75	4.26	54.23	22.27	111.09	26.38	277.46	63.07	595.7	472.9	0.62
PDL-1-25	0.01	27.10	0.07	1.25	3.67	1.51	20.86	7.63	96.85	38.24	181.38	41.14	412.42	88.59	920.7	194.4	0.53
PDL-1-27	0.01	24.83	0.04	0.58	2.26	1.04	14.05	5.10	64.68	26.59	130.62	30.77	327.69	72.55	700.8	385.2	0.56
PDL-1-30	0.01	30.54	0.06	1.08	3.52	1.72	24.63	8.99	108.02	43.23	206.87	45.98	456.64	97.04	1028	256.5	0.56
样品号 PDL-2																	
PDL-2-01	0.01	11.40	0.02	0.54	1.11	0.60	7.59	2.87	38.16	16.77	84.80	21.64	241.58	56.94	484.0	575.3	0.63
PDL-2-02	0.02	12.84	0.06	0.42	1.92	1.21	9.76	3.60	45.52	19.27	97.26	23.80	264.82	61.27	541.8	239.9	0.85
PDL-2-03	0.00	16.34	0.05	0.75	2.13	0.99	13.02	4.75	60.91	24.17	121.13	28.69	297.53	66.52	637.0	261.0	0.58
PDL-2-04	0.00	11.31	0.01	0.17	1.11	0.56	8.49	3.18	39.48	16.81	82.53	19.93	209.94	48.06	441.6	479.4	0.55
PDL-2-05	0.02	16.54	0.05	0.58	1.56	0.82	11.17	4.03	51.46	20.88	104.44	24.68	259.23	57.17	552.6	421.5	0.60
PDL-2-07	2.91	29.19	1.32	6.80	3.07	1.12	12.11	4.46	56.30	23.42	118.29	28.12	297.67	67.18	652.0	238.6	0.56
PDL-2-08	0.06	17.98	0.05	0.71	1.38	0.81	11.88	4.86	62.15	25.59	126.79	29.09	293.75	62.39	637.5	615.4	0.61
PDL-2-09	8.44	34.68	2.57	12.74	3.73	1.18	12.07	4.12	49.65	20.04	99.66	24.15	256.08	58.50	587.6	171.2	0.54
PDL-2-12	0.03	10.65	0.02	0.24	0.71	0.45	6.98	2.70	35.04	15.65	83.60	21.77	239.78	57.97	475.6	1299	0.62
PDL-2-13	0.00	17.60	0.02	0.41	1.68	1.07	11.28	4.25	54.21	22.60	115.66	27.89	293.35	66.62	616.6	451.8	0.75
PDL-2-14	0.00	9.93	0.02	0.19	1.17	0.54	8.78	2.82	35.18	14.82	72.07	17.90	186.21	43.41	393.0	344.2	0.51
PDL-2-17	0.04	13.08	0.06	0.32	1.39	0.57	8.64	3.05	39.25	15.93	81.25	20.19	213.64	49.75	447.2	370.8	0.50
PDL-2-18	0.00	20.46	0.04	0.53	1.48	0.81	10.79	4.09	50.58	20.82	105.05	24.88	260.14	57.48	557.2	582.5	0.62
PDL-2-21	0.00	16.24	0.04	0.36	1.40	0.79	10.34	3.54	44.56	17.68	84.90	19.56	203.83	44.69	447.9	401.1	0.63
PDL-2-22	0.00	19.39	0.00	0.50	1.21	0.83	12.07	4.59	62.51	27.20	136.91	34.54	363.87	83.11	746.7	1154	0.66
PDL-2-24	0.02	21.81	0.06	0.73	1.56	0.85	12.04	4.32	52.77	21.27	107.06	25.82	269.16	59.88	577.3	581.4	0.60
PDL-2-25	0.00	15.27	0.02	0.45	1.39	0.79	11.25	4.38	54.67	22.85	112.35	26.96	281.66	63.40	595.4	531.5	0.61
PDL-2-26	0.04	14.93	0.04	0.76	1.63	0.83	8.24	2.99	38.55	15.70	78.39	19.16	203.57	45.97	430.8	288.0	0.70
PDL-2-27	0.00	20.63	0.04	0.44	1.90	0.82	9.87	3.81	45.96	17.81	89.10	19.94	208.46	46.88	465.7	297.2	0.58
PDL-2-28	0.02	21.13	0.06	1.02	2.37	1.20	15.60	5.76	81.17	31.54	160.73	37.64	390.55	88.47	837.3	358.1	0.60
PDL-2-30	0.00	18.48	0.04	0.66	2.08	0.83	12.40	4.18	51.95	20.15	97.75	21.97	229.72	50.91	511.1	239.2	0.50

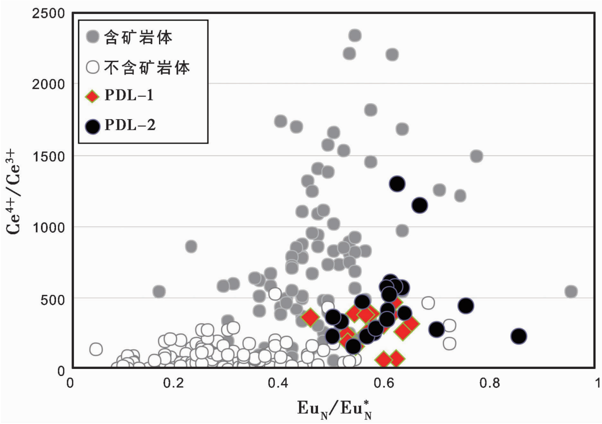

图7 抛刀岭含矿玢岩锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 与 Eu_N/Eu_N^* 特征

Fig. 7 Characteristics of Ce^{4+}/Ce^{3+} and Eu_N/Eu_N^* from zircons in the Paodaoling gold-bearing porphyrites

2001; Xu *et al.*, 2002; Robert *et al.*, 2002; 朱光等, 2003; Wang *et al.*, 2004, 2006, 2007); (3) 俯冲洋壳部分熔融(Ling *et al.*, 2009; Deng *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2010b)。目前最新的研究结果表明，长江中下游含矿埃达克岩的地区化学特征与俯冲洋壳成因相一致，因此长江中下游146～135Ma应该属于俯冲背景下。

与同时代的埃达克岩地球化学特征不同的是，抛刀岭金矿英安玢岩显示高Si、Y和Yb，低Mg、Sr等特征，指示其岩浆源区并没有石榴石残留，且没有发生明显壳幔相互作用。同时，其微量、稀土元素配分趋势与地壳一致，而明显富集大离子亲石元素和亏损高场强元素，不同于MORB等其他地幔储库的地球化学特征，显示其源区有大量的壳源组分的加入。在Pearce *et al.* (1984)花岗岩判别图解中，岩石主要落于岛弧花岗岩区域(图8a, b)。

在$(La/Yb)_N$ vs. $(Yb)_N$图解中(图9)，抛刀岭岩体全部

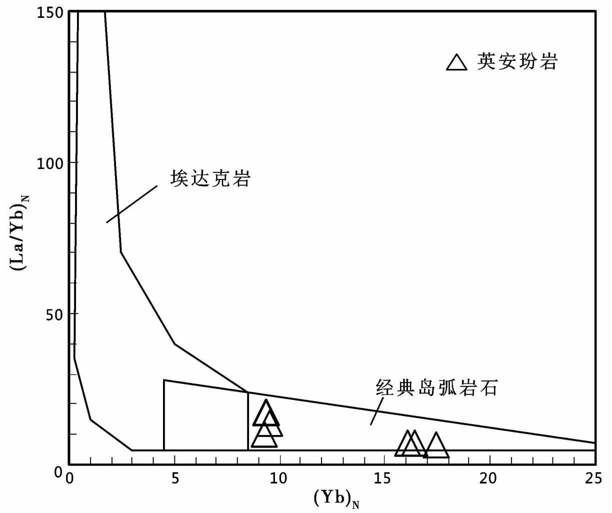

图9 Yb_N-$(La/Yb)_N$判别图解(底图据Defant and Drummond, 1990)

Fig. 9 The Yb_N-$(La/Yb)_N$ discrimination diagram (after Defant and Drummond, 1990)

落入经典岛弧花岗岩中，而非埃达克岩类区域，排除拆沉或洋壳熔融成因。因此，抛刀岭含矿玢岩更有可能来自俯冲带地幔楔熔融并发生结晶分异的结果。

锆石的氧逸度特征也进一步佐证抛刀岭金矿玢岩的源区特征。锆石是中酸性岩浆岩中常见的副矿物而且在后期热液蚀变以及物理化学过程中不易发生改变。而且，锆石结晶过程中，Ce^{4+}比Ce^{3+}优先进入，这意味着Ce^{4+}/Ce^{3+}比值对氧逸度的变化很敏感，可以忠实地反映其结晶时岩浆氧化还原状态。可以使用Ce^{4+}和Ce^{3+}在矿物熔体与结晶矿物之间分配系数的晶格张力模型对所测数据进行Ce^{4+}/Ce^{3+}计算。Ballard *et al.* (2002)通过LA-ICP-MS对智利北部Chuquicamata-E1 Abra斑岩铜矿带中14个不含矿和七个含

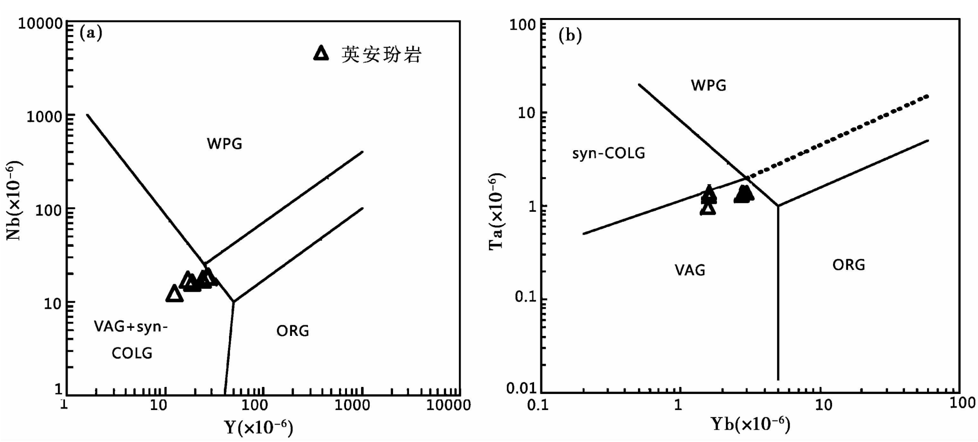

图8 抛刀岭金矿英安玢岩Y-Nb (a)和Yb-Ta图解(b)(底图据Pearce *et al.*, 1984)

WAP-板内花岗岩；VAG-岛弧花岗岩；Syn-CLOG-同碰撞花岗岩；ORG-造山花岗岩

Fig. 8 Y-Nb and Yb-Ta diagram of the Paodaoling ore-bearing porphyries (after Pearce *et al.*, 1984)

矿的钙碱性侵入体进行了全岩与锆石微量元素分析，认为锆石中 Ce^{4+}/Ce^{3+} 与 Eu_N/Eu_N^* 与岩浆中氧化还原度有关系。同样的方法随后被成功地应用于玉龙斑岩铜矿(Liang *et al.*, 2006)和华南地区中生代含矿与不含矿岩体(Li *et al.*,2012)的研究中。本文同样根据 Ballard *et al.* (2002)的方法计算了抛刀岭锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 与 Eu_N/Eu_N^* 特征(表3)。从锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 和 Eu 异常特征看，抛刀岭含矿玢岩锆石落在与智利地区含矿埃达克岩一样的区域范围，显示较高的氧逸度特征。研究表明，俯冲带具有比板内和 MORB 更高的氧逸度特征(Mungall, 2002; Sun *et al.*, 2004, 2011; Ling *et al.*,2009; Sillitoe, 1997; Wang *et al.*,2011)。抛刀岭的锆石氧逸度特征进一步证明该地区应该在太平洋俯冲背景下。研究表明，控制铜金矿床成矿的一个关键因素就是岩体的氧逸度特征。高氧逸度熔体更有成矿的潜力。岩浆的氧逸度控制着熔体中硫的氧化状态：在低氧逸度情况下，岩浆中的硫主要以 S^{2-} 的形式存在；而在高氧逸度情况下，它主要以 SO 和 SO_2 的形式存在。S^{2-} 向 SO 或 SO_2 转换能阻止不混溶的硫化物相的饱和，从而能从正在分馏的熔体中提取 Cu-Au (Sun *et al.*, 2004)。这时高氧逸度岩浆中铜元素在分异和分馏中富集，进入岩浆-热液流体中，从而成矿。同时，从铜金的洋壳、陆壳和地幔储库丰度统计，Sun *et al.* (2010, 2011)发现铜金在俯冲洋壳或岩石圈地幔的丰度远远高于地壳，因此抛刀岭含矿熔体可能受到地幔或者洋壳熔体的加入，使其更具有成矿潜力，经过岩浆演化使金富集成矿。

目前长江中下游中生代岩浆与成矿活动的构造背景还存在较大争论。有人认为中生代该地区处于拉张背景，与太平洋俯冲无关，可能是加厚陆壳拆沉导致的陆壳伸展环境(Li, 2000; Wang *et al.*, 2004, 2006, 2007)。大规模的岩浆与成矿作用主要与拆沉下地壳与地幔相互作用的结果。而 Ling *et al.* (2009)等通过综合研究长江中下游岩浆岩、沉积盆地、构造应力等认为长江中下游在早白垩世受到 Izanagi 板块和太平洋板块中间的洋脊俯冲从而形成，而 Liu *et al.* (2010b)通过对比长江中下游含矿埃达克岩与郯庐南段不含矿埃达克岩的地球化学特征认为，长江中下游埃达克岩主要与洋壳俯冲有关。

从抛刀岭含矿玢岩的岩石源区分析，抛刀岭含矿玢岩可能形成于俯冲背景下地幔楔部分熔融并发生结晶分异的结果。结合锆石年代学特征，该区甚至整个长江中下游地区146~135Ma 时处于古太平洋俯冲背景下。随后发生的双峰式火山岩以及 A 型花岗岩(如花园巩岩体)则是可能是在板片拉张背景下形成(Li *et al.*,2012)。

7 结论

抛刀岭金矿英安玢岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为晚侏罗-早白垩世，与长江中下游铜金成矿主成矿期一致。含矿英安玢岩显示与陆壳相似的地球化学特征，且具有较高的氧逸度特征，显示其与同时代的埃达克形成于同样的构造背景，即古太平洋俯冲。因此，抛刀岭金矿乃至整个长江中下游地区铜金矿床与太平洋俯冲有关，其高氧逸度特征是铜金成矿的关键所在。

References

Ballard JR, Palin JM, and Campbell IH. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(Ⅳ)/Ce(Ⅲ) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144: 347–364

Chang YF, Liu XP and Wu YC. 1991. The Copper-Iron Belt of the Lower-Middle Research of the Changjiang River. Beijing: Geological Publishing House, 294–312 (in Chinese)

Chen GG and Ying XX. 2002. Geological characteristics of the Puzhuang gold deposit in Guichi, Anhui Province. Acta Geoscientia Sinica, 23(3): 213–216 (in Chinese with English abstract)

Chen JF and John BM. 1999. Nd, Sr, Pb isotope tracing and crust evolution of Southeast China. Geochimica, 28(2): 127–140 (in Chinese with English abstract)

Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347(6294): 662–665

Deng J, Wang QF, Xiao CH, Yang LQ, Liu H, Gong QJ and Zhang J. 2011. Tectonic-magmatic-metallogenic system, Tongling ore cluster region, Anhui Province, China. International Geology Review, 53(5–6): 449–476

Deng JH, Yang XY, Sun WD, Huang Y, Chi YY, Yu LF and Zhang QM. 2012. Petrology, geochemistry, and tectonic significance of Mesozoic shoshonitic volcanic rocks, Luzong volcanic basin, eastern China. International Geology Review, 54(6): 714–736

Dong S. 2006. Regional geochemical characteristics of Guichi area in Anhui Province and their ore-prospecting significance. Geochemical and Geochemical Exploration, 30(3): 215–223 (in Chinese with English abstract)

Du YS, Qin XL and Tian SH. 2004. Mesozoic magmatic to hydrothermal process in the Tongguanshan ore field, Tongling, Anhui Province, China: Evidence from xenoliths and their hosts. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 339–350 (in Chinese with English abstract)

Du YS, Li ST, Cao Y, Qing XL and Lou YE. 2007. UAFC-related origin of the Late Jurassic to Early Cretaceous intrusions in the Tongguanshan ore field, Tongling, Anhui Province, East China. Geoscience, 21(1): 71–77 (in Chinese with English abstract)

Gao S, Liu XM, Yuan HL, Hattendorf B, Gunther D, Chen L and Hu SH. 2002. Determination of forty two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. Geostandards Newsletter-the Journal of Geostandards and Geoanalysis, 26(2): 181–196

Gilder SA, Keller GR, Luo M and Goodell PC. 1991. Timing and spatial-distribution of rifting in China. Tectonophysics, 197: 225–243

Hu ZC, Gao S, Liu YS, Hu SH, Chen HH and Yuan HL. 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 23(8): 1093–1101

Li H, Zhang H, Ling MX, Wang FY, Ding X, Zhou JB, Yang XY, Tu XL and Sun WD. 2011. Geochemical and zircon U-Pb study of the Huangmeijian A-type granite: Implications for geological evolution of the Lower Yangtze River belt. International Geology Review, 53(5–6): 499–525

Li H, Ling MX, Li CY, Zhang H, Ding X, Yang XY, Fan WM, Li YL and Sun WD. 2012. A-type granite belts of two chemical subgroups in central eastern China: Indication of ridge subduction. Lithos, doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.021

Li JW, Zhao XF, Zhou MF, Ma CQ, de Souza ZS and Vasconcelos P. 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications. Contributions to Mineralogy and Petrology, 157(3): 383 – 409

Li WD, Mao JR, Zhu YH and Xie HG. 1998. Mesozoic Volcanic Rocks and Deposits in Southeast China. Beijing: Seismic Press, 1 – 156 (in Chinese)

Li XH. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. Journal of Asian Earth Sciences, 18(3): 293 – 305

Li XH, Long WG, Li QL, Liu Y, Zheng Y F, Yang YH, Chamberlain KR, Wan DF, Guo CH, Wang XC and Tao H. 2010. Penglai zircon megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf-O isotopes and U-Pb age. Geostandards and Geoanalytical Research, 34(2): 117 – 134

Liang HY, Campbell IH, Allen CM, Sun WD, Liu CQ, Yu HX, Xie YW and Zhang YQ. 2006. Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet. Mineralium Deposita, 41: 152 – 159

Ling MX, Wang FY, Ding X, Hu YH, Zhou JB, Zartman RE, Yang XY and Sun WD. 2009. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China. Economic Geology, 104(2): 303 – 321

Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chemical Geology, 257(1 – 2): 34 – 43

Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HL. 2010a. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. Chinese Science Bulletin, 55(15): 1535 – 1546

Liu SA, Li SG, He YS and Huang F. 2010b. Geochemical contrasts between early Cretaceous ore-bearing and ore-barren high-Mg adakites in central-eastern China: Implications for petrogenesis and Cu-Au mineralization. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74(24): 7160 – 7178

Ludwig KR. 2003. ISOPLOT 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 4: 1 – 70

Mao JW, Wang YT, Lehmann B, Yu JJ, Du AD, Mei YX, Li YF, Zang WS, Stein HJ and Zhou TF. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River Valley and metallogenic implications. Ore Geology Reviews, 29(3 – 4): 307 – 324

Mao JW, Shao YJ, Xie GQ, Zhang JD and Chen YC. 2009. Mineral deposit model for porphyry-skarn polymetallic copper deposits in the Tongling ore cluster district of Middle-Lower Yangtze Valley metallogenic belt. Mineral Deposits, 28(2): 109 – 119 (in Chinese with English abstract)

McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the earth. Chemical Geology, 120(3 – 4): 223 – 253

Mungall JE. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. Geology, 30: 915 – 918

Pan YM and Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion-and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. Ore Geology Reviews, 15(4): 177 – 242

Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25: 956 – 983

Peccerillo R and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58: 63 – 81

Qi L, Hu J and Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. Talanta, 51: 507 – 513

Robert PR, Xiao L and Shimizu N. 2002. Experimental constrains on the origin of potassium rich adakites in eastern China. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 293 – 302

Sillitoe RH. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. Australian Journal of Earth Sciences, 44: 373 – 388

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Oceanic Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 – 345

Sun WD, Xie Z, Chen JF, Zhang X, Chai ZF, Du AD, Zhao JS, Zhang CH and Zhou TF. 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

Sun WD, Arculus RJ, Kamenetsky VS and Binns RA. 2004. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization. Nature, 431: 975 – 978

Sun WD, Ding X, Hu YH and Li XH. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. Earth and Planetary Science Letters, 262(3 – 4): 533 – 542

Sun WD, Ling MX, Yang XY, Fan W M, Ding X and Liang HY. 2010. Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: An overview. Science China (Earth Sciences), 53(4): 475 – 484

Sun WD Zhang H, Ling MX, Ding X, Chung SL, Zhou JB, Yang XY and Fan WM. 2011. The genetic association of adakites and Cu-Au ore deposits. International Geology Review, 53(5 – 6): 691 – 703

Tian PF, Yang XY, Yuan WM, Liu HT and Xue B. 2012. Fission track dating on the Paodaoling gold deposit in the middle-lower Yangtze River metallogenic belt: Its significance to tectonic setting. Acta Geologica Sinica, 86(3): 400 – 409 (in Chinese with English abstract)

Tao KY, Mao JR, Yang ZL, Zhao Y, Xing GF and Xue HM. 1998. Mesozoic Preto-tectonic associations and record of the geodynamic processes in Southeast China. Earth Science Frontiers, 5(4): 183 – 192 (in Chinese with English abstract)

Wang Q, Zhao ZH, Bao ZW, Xu JF, Liu W, Li CF, Bai ZH and Xiong XL. 2004. Geochemistry and petrogenesis of the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks and the associated porphyry copper-molybdenum mineralization in Southeast Hubei, East China. Resource Geology, 54(2): 137 – 152

Wang Q, Zhao ZH, Xu JF, Bai ZH, Wang JX and Liu CX. 2004. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks in Southern Hubei: (Delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 351 – 360 (in Chinese with English abstract)

Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Li CF and Bai ZH. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. Lithos, 89(3 – 4): 424 – 446

Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Zhao ZH, Jian P and Zi F. 2007. Partial melting of thickened or delaminated lower crust in the middle of eastern China: Implications for Cu-Au mineralization. Journal of Geology, 115(2): 149 – 161

Wang FY, Ling MX, Ding X, Hu YH, Zhou JB, Yang XY, Liang HY, Fan WM and Sun WD. 2011. Mesozoic large magmatic events and mineralization in SE China: Oblique subduction of the Pacific plate. International Geology Review, 53: 704 – 726

Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, von Quadt A, Roddick JC and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. Geostandards Newsletter, 19(1): 1 – 23

Winchester JA and Floyd PA. 1976. Geochemical magma type discriminations: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks. Earth and Planetary Science Letters, 28: 459 – 469

Wu FY, Ji WQ, Sun DH, Yang YH and Li XH. 2012. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province, China. Lithos, doi : 10.1016/j.

lithos. 2012. 03. 020

Xie GQ, Mao JW, Li RL and Bierlein FP. 2008. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt, Eastern China: Petrogenesis and tectonic setting. Lithos, 104(1-4): 216-230

Xie GQ, Mao J and Zhao HJ. 2011. Zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic constraints on petrogenesis of Late Mesozoic intrusions in the southeast Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt (MLYRB), East China. Lithos, 125(1-2): 693-710

Xie JC, Yang XY, Sun WD, Du JG, Xu W, Wu LB, Wang KY and Du XW. 2009. Geochronological and geochemical constraints on formation of the Tongling metal deposits, Middle Yangtze metallogenic belt, east-central China. International Geology Review, 51(5): 388-421

Xie JC, Yang XY, Xiao YL, Du JG and Sun WD. 2012. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks from the Tongling ore cluster region: The metallogenic significance. Acta Geologica Sinica, 86(3): 423-459 (in Chinese with English abstract)

Xing FM and Xu X. 1995. Characteristics of Mesozoic igneous rocks along the Yangtze River in Anhui Province. Acta Petrologica Sinica, 11(4): 409-422 (in Chinese with English abstract)

Xu JF, Wang Q, Xu YG, Zhao ZH and Xiong XL. 2001. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion. Acta Geologica Sinica, 17(4): 576-584 (in Chinese with English abstract)

Xu JF, Shinjo R, Defant MJ, Wang Q and Rapp RP. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? Geology, 30(12): 1111-1114

Yang XY and Lee IS. 2011. Review of the stable isotope geochemistry of Mesozoic igneous rocks and Cu-Au deposits along the Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt, China. International Geology Review, 53(5-6): 741-757

Yu CH and Yuan XM. 1999. The petrochemical and geochemical characteristics of the Tongshan intrusive, Guichi. Geology of Anhui, 9(3): 194-198 (in Chinese with English abstract)

Yu CH. 2001. Study on the genesis of Tongshan copper ore deposit in Guichi. Geology and Prospecting, 37(2): 112-116 (in Chinese with English abstract)

Zhai YS, Yao SZ, Lin XD, Zhou XR, Wan TF, Jin FQ and Zhou ZG. 1992. Metallogeny of Iron and Copper Deposits in the Middle-Lower Yangtze River Region. Beijing: Geological Publishing House, 1-194 (in Chinese)

Zhang ZY, Du YS, Zhang J and Pang ZH. 2011. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, petrochemical and geochemical characteristics of Tongshan intrusion in Guichi, Anhui Province. Geological Review, 57(3): 366-378 (in Chinese with English abstract)

Zhao DK, Wang MS, Zhu YS and Fang M. 2009. Geological features and genesis of the Paodaoling gold ore deposit, Guichi, Anhui Province. Geology of Anhui, 19(2): 107-110 (in Chinese with English abstract)

Zhou SG. 2003. Matter source of the Tongshan deposit and its mineralization. Mineral Resources and Geology, 17(5): 610-612 (in Chinese with English abstract)

Zhou TF, Fan Y and Yuan F, Lu SM, Shang SG, David C, Sebastien M and Zhao GC. 2008. Geochronology of the volcanic rocks in the Lu-Zong basin and its significance. Science in China (Series D), 51(10): 1470-1482

Zhou TF, Fan Y and Yuan F. 2008. Advances on petrogensis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area. Acta Petrologica Sinica, 24(8): 1665-1678 (in Chinese with English abstract)

Zhu G, Liu GS, Niu ML, Song CZ and Wang DX. 2003. Transcurrent movement and genesis of the Tan-Lu fault zone. Geological Bulletin of China, 22(3): 200-207 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

常印佛，刘湘培，吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京：地质出版社，294-312

陈国光，应祥熙. 2002. 安徽省贵池铺庄金矿地质特征. 地球学报，23(3)：213-216

陈江峰，江博明. 1999. Nd，Sr，Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化. 地球化学，28(2)：127-140

董胜. 2006. 安徽省贵池地区区域地球化学特征及找矿意义. 物探与化探，30(3)：215-223

杜杨松，秦新龙，田世洪. 2004. 安徽铜陵铜官山矿区中生代岩浆-热液过程：来自岩石包体及其寄主岩的证据. 岩石学报，20(2)：339-350

杜杨松，李顺庭，曹毅，秦新龙，楼亚儿. 2007. 安徽铜陵铜官山矿区中生代侵入岩的形成过程-岩浆底侵、同化混染和分离结晶. 现代地质，21(1)：71-77

毛景文，邵拥军，谢桂青，张建东，陈毓川. 2009. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型. 矿床地质，28(2)：109-119

陶奎元，毛建仁，杨祝良，赵宇，邢光福，薛怀民. 1998. 中国东南部中生代岩石构造组合和复合动力学过程的记录. 地学前缘，5(4)：183-192

田朋飞，杨晓勇，袁万明，刘海涛，薛斌. 2012. 长江中下游成矿带抛刀岭金矿裂变径迹研究及大地构造意义. 地质学报，86(3)：400-409

王强，赵振华，许继峰，白正华，王建新，刘成新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比：(拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因. 岩石学报，20(2)：351-360

谢建成，杨晓勇，肖益林，杜建国，孙卫东. 2012. 铜陵矿集区中生代侵入岩成因及成矿意义. 地质学报，86(3)：423-459

邢凤鸣，徐祥. 1995. 安徽沿江地区中生代岩浆岩的基本特点. 岩石学报，11(4)：409-422

许继峰，王强，徐义刚，赵振华，熊小林. 2001. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学：亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制. 岩石学报，17(4)：576-584

俞沧海，袁小明. 1999. 贵池铜山岩体岩石化学与地球化学特征. 安徽地质，9(3)：194-198

俞沧海. 2001. 贵池铜山铜矿床成因探讨. 地质与勘探，37(2)：12-16

翟裕生，姚书振，林新多，周珣若，万天丰，金福全，周宗桂. 1992. 长江中下游地区铜(金)成矿规律. 北京：地质出版社，1-194

张智宇，杜杨松，张静，庞振山. 2011. 安徽贵池铜山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学与岩石地球化学特征研究. 地质论评，57(3)：366-378

赵德奎，汪梅生，朱永胜，方梅. 2009. 安徽省贵池撼刀岭金矿地质特征及成因. 安徽地质，19(2)：107-110

周曙光. 2003. 安徽铜山矿床成矿物质来源及成矿作用探讨. 矿床与地质，17(5)：610-612

周涛发，范裕，袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报，24(8)：1665-1678

朱光，刘国生，牛曼兰，宋传中，王道轩. 2003. 郯庐断裂带的平移运动与成因. 地质通报，22(3)：200-207