

doi: 10.12029/gc20190416

黄文明, 吴才来, 高栋, 吴迪, 刘川云, 曾全. 2019. 安徽铜陵沙滩脚矿田中酸性侵入岩成因及构造意义[J]. 中国地质, 46(2): 861–877.

Huang Wenming, Wu Cailai, Gao Dong, Wu Di, Liu Chuanyun, Zeng Quan. 2019. Petrogenesis and tectonic implications of the intermediate-acid plutons in Shatanjiao ore-field, Tongling, Anhui[J]. *Geology in China*, 46(2): 861–877(in Chinese with English abstract).

安徽铜陵沙滩脚矿田中酸性侵入岩成因及构造意义

黄文明¹, 吴才来², 高栋², 吴迪³, 刘川云¹, 曾全¹

(1. 安徽省地质矿产勘查局 321 地质队, 安徽 铜陵 244033; 2. 自然资源部深地动力学重点实验室/中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要:安徽省铜陵地区是中国著名的以矽卡岩和斑岩型矿床为主的铜-金多金属矿集区, 区内广泛产出的中酸性侵入岩与成矿关系十分密切。沙滩脚矿田位于该矿集区的东部, 出露沙滩脚、桂花冲和姚家岭岩体及其不同规模、不同矿化类型的铜、金、锌等矿床, 岩体对成矿起了重要的控制作用。本文在前人研究的基础上, 对该矿田内的沙滩脚、姚家岭、桂花冲 3 个岩体进行了详细的岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究, 以期查明沙滩脚矿田中酸性侵入岩的成因及成岩构造环境。岩石地球化学分析表明, 3 个岩体具有准铝质特征, 均属于高钾钙碱性 I 型花岗岩类, 轻稀土富集, 重稀土亏损, 具有弱的负 Eu 异常, 富集 Rb、Th 等元素, 亏损 Nb、Ta 等高场强元素。姚家岭岩体的锆石 U-Pb 年龄为 140.4~140.9 Ma, 沙滩脚岩体形成时代相对较早 (141.4~144.1 Ma), 桂花冲岩体形成相对较晚 (138.3 Ma)。结合区域地质背景, 笔者认为沙滩脚矿田的这些岩体形成于早白垩世伸展环境, 是由来自于富集地幔的分异的碱性玄武质岩浆与地壳易熔组部分熔融形成的花岗质岩浆混合后分期侵位形成的。

关键词:中酸性侵入岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 年代学; 沙滩脚矿田; 铜陵

中图分类号: P588.12⁺1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)04-0861-17

Petrogenesis and tectonic implications of the intermediate-acid plutons in Shatanjiao ore-field, Tongling, Anhui

HUANG Wenming¹, WU Cailai², GAO Dong², WU Di³, LIU Chuanyun¹, ZENG Quan¹

(1. 321 Geology Party, Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province, Tongling 244033, Anhui, China; 2. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of MNR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037; 3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081)

Abstract: The Tongling area of Anhui Province is a famous copper-gold polymetallic ore concentration area dominated by skarn and porphyry type deposits in China. The widely exposed intermediate-acid intrusive rocks in the area are closely related to mineralization. The Shatanjiao ore-field is located in the eastern part of the ore concentration area. The Shatanjiao, Guihuachong and Yaojialing rock bodies and their copper, gold and zinc deposits of different scales and mineralization types are exposed. Rock

收稿日期: 2018-07-14; 改回日期: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472063)资助。

作者简介: 黄文明, 男, 1962 年生, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查及相关的研究工作; E-mail: tl321hwm@126.com。

通讯作者: 吴才来, 男, 1960 年生, 博士, 研究员, 从事火成岩岩石学研究; E-mail: wucailai@126.com。

bodies play an important role in controlling mineralization. On the basis of previous studies, a detailed studies on petrography, geochemistry and zircon U–Pb chronology for Shatanjiao, Yaojialing and Guihuachong plutons in the ore–field were carried out in order to find out the petrogenesis of these plutons and their forming tectonic setting. Geochemically, the three plutons have a metaluminous characteristics, all of which belong to high–potassium calc–alkaline series I–type granites with depletion in HREE, Nb, Ta, and enrichment in LREE, Rb, Th, and slightly negative Eu anomaly. The zircon U–Pb age of the Yaojialing pluton is 140.4 – 140.9Ma, while the Shatanjiao pluton formed relatively earlier (141.4 – 144.1 Ma), and the Guihuachong pluton formed later (138.3Ma). Combined with the regional geology, we infer that these plutons in the ore–field were emplaced in the early Cretaceous extended environment, which is crystallized from a mixed magma between a differentiated basaltic magma derived from the enriched mantle and a felsic magma from the partial melting of crustal fusible component.

Key words: intermediate–acid intrusive rock; geochemistry; Zircon U–Pb chronology; Shatanjiao ore–field; Tongling

About the first author: Huang Wenming, male, born in 1962, senior engineer, mainly engages in geological prospecting; E–mail: tl321hwm@126.com.

About the corresponding author: WU Cailai, male, born in 1960, doctor, professor, engages in igneous petrology; E–mail: wucailai@126.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41472063).

1 引 言

铜陵地区位于长江中下游铁–铜–金多金属成矿带的中段,是中国著名的以矽卡岩–斑岩型矿床为主的铜、金多金属矿集区。前人研究表明,铜陵矿集区铜、金多金属矿床与中生代中酸性岩浆活动密切相关(常印佛等,1983,2017;翟裕生等,1992;周珣若等1993;吴才来等,1997,2003,2008,2010a,b,2013;储国正等,1999,2000;Wu et al.,2000,2014,2017;田世洪等,2001;王元龙等,2004;雷敏等,2010;孟祥金等,2011;楼金伟等,2012;李名则等,2016)。该矿集区自西向东具有铜官山、狮子山、焦冲、新桥头、舒家店、凤凰山、沙滩脚7个矿田。前6个矿田中的侵入岩前人已做过较多的研究,而对沙滩脚矿田内的侵入岩研究则相对薄弱。近年来,随着沙滩脚矿田内姚家岭大型锌金矿和桂花冲中型铜金矿的发现,矿田内的中酸性侵入岩的成因引起了众多学者的关注,不少学者对这些侵入岩做了较深入的研究(狄永军等,2005;吴星星等,2011;韩长生等,2013;刘绍锋等,2013;刘建敏等,2014;岳紫龙等,2015,2016;李晓晖,2016;殷延瑞等,2016;黄文明等,2016;何柳昌等,2018)。沙滩脚矿田内主要岩体有沙滩脚花岗闪长岩、桂花冲花岗闪长斑岩和姚家岭斑状花岗闪长岩。研究表明,沙滩脚矿田内的姚家岭锌金矿(大型–特大型)主要产在岩体内部灰岩捕虏体的层间破碎带及其与岩

体的接触带,而桂花冲铜金矿(中型)产于岩体接触带及内部,岩体具有细脉–浸染状矿化特征;沙滩脚铜矿(小型)却产于岩体与围岩接触带的矽卡岩中(蒋其胜等,2005;吴才来等,2013;黄文明等,2016;殷延瑞等,2016)。为什么同一个矿田内成矿特点、成矿规模如此不同?岩体是否起了关键的作用?如果是这样,那么不同岩体在地质特征、岩石学特征及地球化学特征上有何异同?它们形成的时代及成因是否一致?因此,本文对矿田内的沙滩脚、姚家岭、桂花冲3个岩体进行了岩石学、地球化学和年代学方面的研究,结合前人已有的研究成果,着重探讨它们的成因类型及形成的构造环境,试图对沙滩脚矿田深部找矿的前景作出判断。

2 岩体地质及岩相学特征

铜陵矿集区位于扬子板块北缘,长江中下游铁–铜–金多金属成矿带的中部,自西向东分布着7个矿田。其中的沙滩脚矿田位于铜官山–戴家汇构造岩浆带的东端,戴公山背斜北东段,北面与繁昌火山凹陷相邻,东面与宣南拗陷接壤(图1a,b)。

区内地层从志留系到白垩系出露较齐全,仅缺失下、中泥盆统和下石炭统(图2)。志留系中统至泥盆系上统为半深海相的笔石页岩及陆相碎屑岩沉积;石炭系黄龙、船山组至三叠系中统东马鞍山组以滨海–浅海相的碳酸盐岩为主,夹半深海硅质岩及海陆交互的碎屑岩;侏罗系上统至白垩系上

统宣南组为陆相火山碎屑岩。中生代以来,沙滩脚矿田所在的区域构造活动频繁,印支期褶皱构造和燕山期岩浆侵入、火山喷发活动叠加复合,奠定了区内主要的构造格局。沙滩脚矿田内断裂构造发育,主要为北东向和北西向2组,北东向断层为纵断层,主要有大青滂断层,北西向断层为横断层,主要有戴公山破碎带、青山南破碎带和矿田中部被花岗斑岩墙所占据的断层。矿田内岩浆岩发育,主要

有沙滩脚岩体、姚家岭岩体以及桂花冲岩体。各岩体地质特征分述如下。

沙滩脚岩体:平面形态不规则,大致呈北东向产出,出露面积约5.5 km²,呈岩株状侵入,围岩以三叠纪、二叠纪灰岩为主。岩体中发育暗色微粒包体。主要岩性为花岗闪长岩,呈灰白色,不等粒粒状结构,局部为似斑状结构,块状构造。主要矿物组成为斜长石(50%),可见环带结构;钾长石(25%),

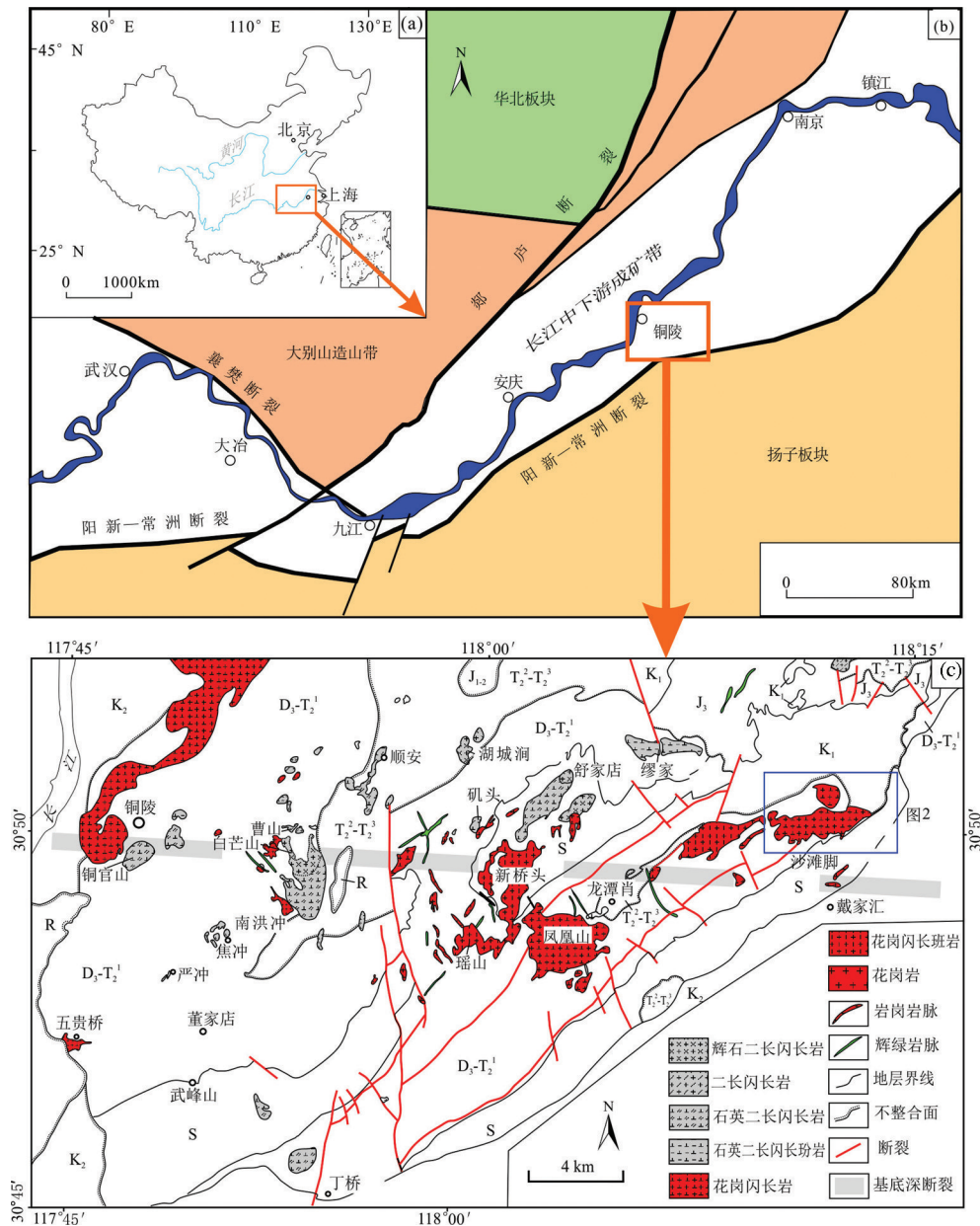


图1 长江中下游成矿带位置及构造单元简图(a,b)及铜陵矿集区地质简图(c,据 Wu et al.,2014)
Fig.1 Location and structural map of the Middle–Lower Yangtze River Valley metallogenic belt (a,b)and geological sketch map of the Tongling ore district (c,after Wu et al.,2014)

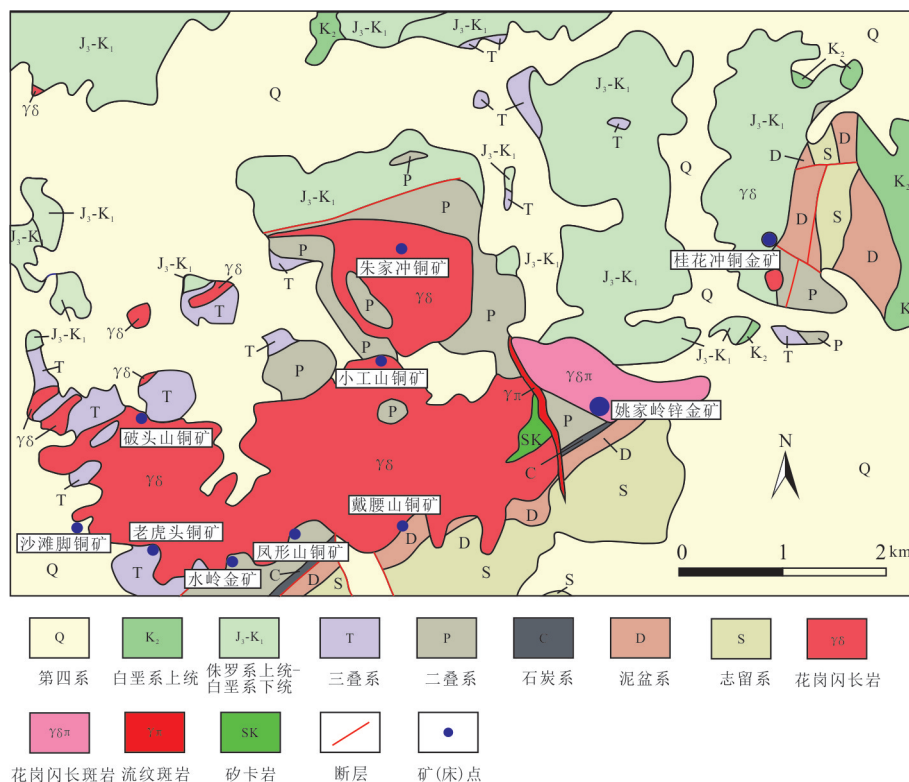


图2 沙滩脚矿田地质简图

Fig.2 Geological sketch map of Shatanjiao ore-field

以微斜长石为主,可见格子双晶;石英(20%),他形浑圆状;暗色矿物为角闪石(2%)和黑云母(3%)(图3a),副矿物为磷灰石、锆石、磁铁矿等。

姚家岭岩体:位于沙滩脚岩体东部,地表出露形态呈北西西向的不规则长条状,围岩主要为志留系坟头组粉砂质页岩至二叠系栖霞组灰岩,地表出露面积约0.60 km²。经钻孔揭露该岩体呈东西向延伸,出露面积1.25 km²。主要岩性为斑状花岗闪长岩,呈浅灰至灰白色,似斑状结构,块状、角砾状构造。主要矿物组成为斜长石(55%),其次为钾长石(20%)、石英(20%)、角闪石(3%)、黑云母(2%)等(图3b),部分呈斑晶的石英被熔蚀,呈圆形港湾状。副矿物为锆石、磷灰石等。

桂花冲岩体:位于沙滩角和姚家岭岩体的北东方向,距姚家岭岩体约1 km。岩体的围岩主要为三叠系下统南陵湖组及和龙山组石灰岩。地表出露面积约0.05 km²。主要岩性为花岗闪长斑岩,呈灰色至深灰色,斑状结构,角砾状、块状构造。主要矿物组成为斜长石(52%),钾长石(15%),石英(18%),黑云母(6%)和角闪石(9%)。主要副矿物

为磁铁矿、磷灰石、锆石等。岩相学特征与姚家岭岩体的相似(图3c),但斜长石发育绢云母化。

3 分析测试方法

3.1 锆石 U-Pb 定年

锆石的分选工作在河北廊坊区调院完成,将样品破碎至60~80目并用清水淘洗干净,用磁铁除去磁铁矿等磁性矿物,再用重液选出锆石,在双目镜下挑出晶形较好的锆石。然后将锆石和标样一起粘在玻璃板上,用环氧树脂浇铸,制成薄片、抛光。锆石阴极发光照片拍摄及最后测试工作在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学重点实验室完成,所用仪器采用美国 Thermo Fisher 公司 Neptune Plus 型多接收等离子体质谱仪和美国 Coherent 公司生产的 GeoLasPro 193 nm 激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS),使用的激光剥蚀束直径为32 μm,频率为8 Hz,使用He作为剥蚀物质的载气,锆石年龄统一采用91500标准锆石作为外部标样,选用GJ-1作为辅助标样对数据的准确性进行验证。最后的数据处理采用ICPMSDataCal程序获得

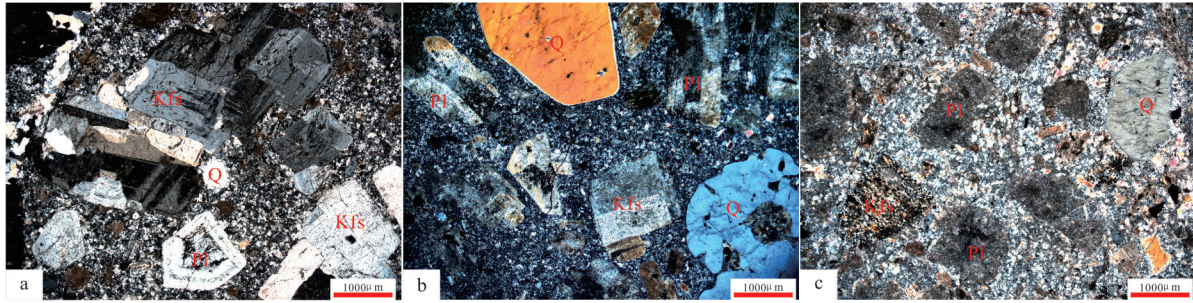


图3 沙滩脚矿田3个岩体镜下照片

a—沙滩脚岩体,不等粒-似斑状结构;b—姚家岭岩体,似斑状结构;c—桂花冲岩体,似斑状结构,斜长石强烈的绢云母化;Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Q—石英

Fig.3 Microphotographs of the three plutons in Shtanjiao ore-field

a—Shtanjiao pluton, inequigranular and porphyritic-like texture; b—Yaojialing pluton, porphyritic-like texture; c—Guihuachong pluton, porphyritic-like texture, strong sericitization for plagioclase; Pl—Plagioclase; Kfs—Potash feldspar; Q—Quartz

(Liu et al., 2010), 锆石年龄谐和图用 Isoplot 程序获得(Ludwig, 2003)。

3.2 全岩化学分析

在显微镜下对岩石样品薄片进行观察,挑选出新鲜的样品做全岩化学分析。将样品研磨至200目以下,用于全岩主微量元素分析,全岩粉末样制备工作由廊坊诚信地质服务公司完成。样品主量元素、稀土元素和微量元素的测试工作在广州澳实矿物实验室完成,主量元素分析采用X射线荧光熔片法完成,分析精度分别为:SiO₂: 1.0%; Al₂O₃: 0.5%; Fe₂O₃: 0.4%; MgO: 0.4%; CaO: 0.6%; Na₂O: 0.3%; K₂O: 0.4%; MnO: 0.7%; TiO₂: 0.9%; P₂O₅: 0.8%。微量元素分析采用HF + HNO₃溶解样品,加入Rh内标溶液后转化为1% HNO₃,用Peelan 6000型ICP MS完成测定,REE含量测试误差7%以下,其余微量元素的误差低于10%。

4 分析结果

4.1 锆石U-Pb定年

本次研究选择姚家岭岩体的两个样品进行了锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb同位素年代学测试,分析结果见表1。

样品17CL564(样品为斑状花岗闪长岩):锆石呈长柱状,阴极发光照片显示具有清晰的岩浆振荡环带(图4a)。共选取了30颗锆石进行U-Pb同位素测试,其中Th含量为 $185.2 \times 10^{-6} \sim 590.5 \times 10^{-6}$,平均值为 386.3×10^{-6} 。U含量为 $302.6 \times 10^{-6} \sim 644.3 \times 10^{-6}$,平均值为 443.8×10^{-6} ,²³²Th/²³⁸U比值为0.61~1.11,平均值为0.86,属于典型的岩浆锆石(Corfu,

2003;Wu et al.,2004)。剔除铅丢失严重的数据点后,剩余24个有效点的U-Pb谐和线年龄为 $(140.4 \pm 0.4) \text{Ma}$ (MSWD=0.07)。将24个有效点的²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄加权平均,获得平均年龄为 $(140.4 \pm 0.9) \text{Ma}$ (MSWD=0.90),与谐和线年龄在误差范围内一致,代表岩体的形成年龄(图4b)。

样品17CL566(样品为斑状花岗闪长岩)。共选取了30颗锆石进行U-Pb同位素年龄测试。阴极发光照片显示锆石呈柱状,具有清晰的岩浆振荡环带(图4c)。测定结果表明,锆石的Th、U含量变化较大,其中Th的含量为 $17.8 \times 10^{-6} \sim 733.1 \times 10^{-6}$,平均 307.3×10^{-6} ,U的含量为 $32.1 \times 10^{-6} \sim 745.1 \times 10^{-6}$,平均 426.3×10^{-6} ,²³²Th/²³⁸U比值为0.31~0.98,平均0.69,属于典型的岩浆锆石。剔除铅丢失严重的数据点后,获得该样品28个有效点U-Pb谐和线年龄为 $(140.8 \pm 0.8) \text{Ma}$ (MSWD=0.66),将其²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄加权平均,获得的加权平均年龄为 $(140.9 \pm 0.7) \text{Ma}$ (MSWD=0.6),与谐和年龄在误差范围内一致,代表岩体的形成年龄(图4d)。

4.2 地球化学特征

根据我们的分析数据,结合前人已有的研究成果,综合对比了沙滩脚、姚家岭及桂花冲岩体的岩石地球化学特征,数据如表2所示。

(1)主量元素

沙滩脚岩体SiO₂含量为64.6%~65.2%,平均含量为65.0%。Al₂O₃含量为15.67%~16.12%,平均值为15.96%。TFe₂O₃含量为1.20%~3.48%,平均值为2.30%。MgO含量为0.50%~1.89%,平均值为1.14%。全碱含量(ALK)为6.79%~10.11%,平均值

表1 姚家岭岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果
Table 1 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data of the Yaojialing pluton

样品号及分析 点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma	
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
17CL564-3-01	99.43	541.1	604.0	0.90	0.0487	0.0004	0.1436	0.0021	0.0214	0.0003	136.4	1.8
17CL564-3-02	54.48	280.5	383.4	0.73	0.0488	0.0005	0.1487	0.0023	0.0221	0.0003	140.8	2.0
17CL564-3-03	69.71	364.2	430.3	0.85	0.0487	0.0006	0.1469	0.0025	0.0219	0.0003	139.6	2.1
17CL564-3-04	76.19	402.5	461.7	0.87	0.0489	0.0005	0.1478	0.0022	0.0219	0.0003	139.8	1.7
17CL564-3-05	88.61	472.7	505.6	0.94	0.0486	0.0004	0.1472	0.0024	0.0220	0.0003	140.2	2.2
17CL564-3-08	80.96	419.8	617.4	0.68	0.0486	0.0005	0.1442	0.0020	0.0215	0.0003	137.2	1.7
17CL564-3-09	87.80	459.8	484.7	0.95	0.0484	0.0005	0.1498	0.0027	0.0224	0.0003	143.0	2.2
17CL564-3-11	75.77	395.6	455.6	0.87	0.0486	0.0005	0.1493	0.0024	0.0223	0.0003	142.1	2.0
17CL564-3-12	52.46	273.1	432.6	0.63	0.0485	0.0005	0.1472	0.0026	0.0220	0.0004	140.3	2.3
17CL564-3-13	117.7	590.5	644.3	0.92	0.0495	0.0005	0.1564	0.0034	0.0229	0.0005	146.1	3.4
17CL564-3-14	51.29	267.5	362.2	0.74	0.0496	0.0006	0.1511	0.0025	0.0221	0.0004	140.9	2.4
17CL564-3-15	99.78	523.5	472.1	1.11	0.0484	0.0005	0.1492	0.0024	0.0223	0.0003	142.5	2.1
17CL564-3-17	67.12	346.6	381.1	0.91	0.0492	0.0007	0.1522	0.0022	0.0224	0.0003	143.0	2.1
17CL564-3-19	106.9	569.5	511.4	1.11	0.0485	0.0005	0.1503	0.0030	0.0224	0.0004	143.0	2.6
17CL564-3-20	80.10	420.5	453.6	0.93	0.0487	0.0006	0.1483	0.0026	0.0221	0.0003	140.6	2.2
17CL564-3-21	44.74	228.1	321.7	0.71	0.0488	0.0006	0.1496	0.0031	0.0222	0.0004	141.7	2.7
17CL564-3-22	92.08	505.6	459.2	1.10	0.0488	0.0006	0.1468	0.0025	0.0218	0.0003	139.2	1.9
17CL564-3-23	42.70	227.5	326.0	0.70	0.0500	0.0017	0.1510	0.0069	0.0218	0.0003	139.1	2.2
17CL564-3-24	70.45	378.0	410.0	0.92	0.0488	0.0006	0.1479	0.0027	0.0220	0.0003	140.1	2.1
17CL564-3-25	36.94	185.2	302.6	0.61	0.0488	0.0006	0.1497	0.0029	0.0223	0.0004	141.9	2.4
17CL564-3-26	55.20	294.8	352.1	0.84	0.0483	0.0005	0.1450	0.0022	0.0218	0.0003	139.0	1.9
17CL564-3-28	69.86	365.5	478.1	0.76	0.0494	0.0005	0.1491	0.0025	0.0219	0.0003	139.5	2.2
17CL564-3-29	52.94	267.9	326.6	0.82	0.0489	0.0005	0.1514	0.0031	0.0225	0.0004	143.3	2.7
17CL564-3-30	92.22	491.8	474.1	1.04	0.0484	0.0005	0.1477	0.0024	0.0221	0.0003	141.1	2.0
17CL566-3-01	51.46	269.3	450.8	0.60	0.0489	0.0005	0.1490	0.0023	0.0221	0.0003	140.8	1.8
17CL566-3-02	133.3	733.1	745.1	0.98	0.0488	0.0004	0.1470	0.0020	0.0218	0.0003	139.3	1.8
17CL566-3-03	64.66	346.9	385.6	0.90	0.0491	0.0005	0.1510	0.0028	0.0223	0.0004	142.2	2.3
17CL566-3-04	42.08	215.6	346.9	0.62	0.0509	0.0012	0.1548	0.0047	0.0220	0.0002	140.6	1.5
17CL566-3-05	41.66	215.9	274.8	0.79	0.0513	0.0010	0.1567	0.0030	0.0222	0.0002	141.3	1.4
17CL566-3-06	62.40	324.9	545.9	0.60	0.0496	0.0014	0.1513	0.0059	0.0221	0.0003	140.7	1.9
17CL566-3-07	77.53	412.3	613.4	0.67	0.0497	0.0005	0.1510	0.0021	0.0221	0.0003	140.6	2.0
17CL566-3-09	80.93	450.4	493.9	0.91	0.0488	0.0005	0.1478	0.0024	0.0220	0.0003	140.1	2.0
17CL566-3-10	36.70	187.5	289.6	0.65	0.0489	0.0006	0.1518	0.0026	0.0225	0.0003	143.5	2.0
17CL566-3-11	53.63	284.2	386.3	0.74	0.0488	0.0005	0.1489	0.0024	0.0221	0.0003	141.2	1.9
17CL566-3-12	35.58	176.8	421.9	0.42	0.0493	0.0005	0.1510	0.0028	0.0222	0.0003	141.7	2.1
17CL566-3-13	67.56	355.1	486.7	0.73	0.0490	0.0005	0.1494	0.0024	0.0221	0.0003	141.1	1.7
17CL566-3-14	67.86	357.3	604.4	0.59	0.0487	0.0004	0.1488	0.0021	0.0221	0.0002	141.2	1.5
17CL566-3-15	51.21	267.1	364.0	0.73	0.0491	0.0005	0.1511	0.0024	0.0223	0.0003	142.2	1.9
17CL566-3-16	43.57	216.6	373.5	0.58	0.0492	0.0005	0.1530	0.0025	0.0226	0.0003	143.8	2.1
17CL566-3-17	78.38	428.1	501.2	0.85	0.0490	0.0004	0.1480	0.0022	0.0219	0.0003	139.7	1.7
17CL566-3-18	51.76	272.5	379.8	0.72	0.0490	0.0006	0.1507	0.0026	0.0223	0.0003	142.2	1.9
17CL566-3-19	45.08	230.7	422.5	0.55	0.0493	0.0005	0.1508	0.0025	0.0222	0.0003	141.4	1.8
17CL566-3-20	3.50	17.78	32.15	0.55	0.0494	0.0017	0.1503	0.0056	0.0221	0.0004	140.7	2.2
17CL566-3-22	70.99	379.2	480.3	0.79	0.0492	0.0005	0.1506	0.0021	0.0222	0.0003	141.6	1.6
17CL566-3-23	112.0	634.9	673.4	0.94	0.0489	0.0004	0.1462	0.0019	0.0217	0.0002	138.3	1.5
17CL566-3-24	54.71	278.7	497.8	0.56	0.0490	0.0004	0.1507	0.0027	0.0223	0.0003	142.3	2.1
17CL566-3-25	9.20	43.18	138.0	0.31	0.0489	0.0008	0.1469	0.0030	0.0218	0.0003	138.9	2.1
17CL566-3-26	68.04	368.6	379.3	0.97	0.0492	0.0006	0.1497	0.0029	0.0221	0.0003	140.8	2.2
17CL566-3-27	33.86	176.3	324.2	0.54	0.0491	0.0005	0.1487	0.0026	0.0220	0.0003	140.0	1.9
17CL566-3-28	39.22	188.4	427.2	0.44	0.0515	0.0014	0.1569	0.0051	0.0221	0.0003	140.9	1.9
17CL566-3-29	78.72	446.3	474.7	0.94	0.0487	0.0005	0.1452	0.0021	0.0216	0.0002	137.8	1.6
17CL566-3-30	62.30	327.2	423.2	0.77	0.0488	0.0005	0.1516	0.0027	0.0225	0.0003	143.6	2.2

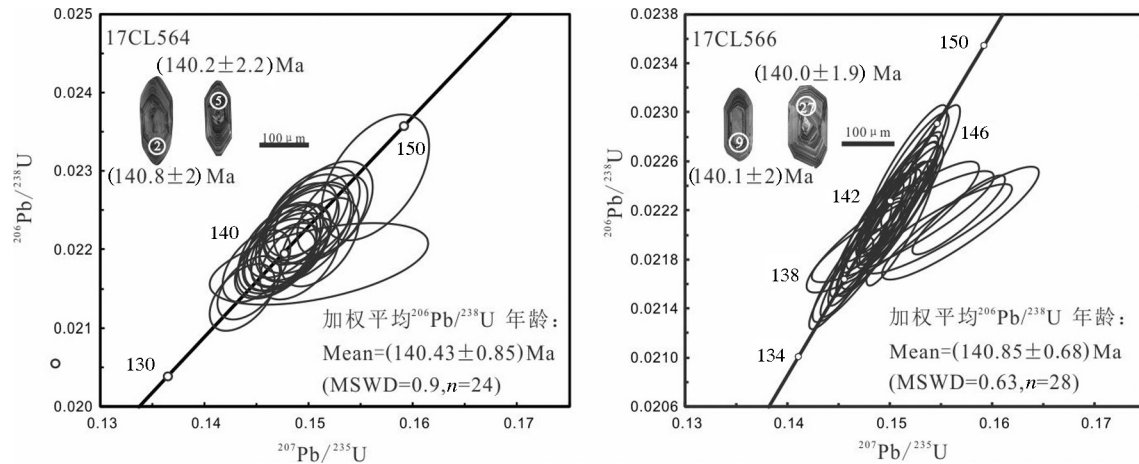


图4 姚家岭岩体锆石阴极发光图像和锆石U-Pb谐和年龄及加权平均年龄

Fig.4 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircon grains and zircon U-Pb concordia plot of the Yaojialing pluton

为7.90%。 K_2O/Na_2O 为0.42~0.81,平均值为0.67。里特曼指数为2.07~4.49,平均值为2.85。铝饱和指数(A/CNK)为0.81~0.87,平均值为0.85。

与沙滩脚岩体相比,姚家岭岩体 SiO_2 的含量相似,为61.71%~67.78%(平均为65.79%); Al_2O_3 、 TFe_2O_3 含量变化较大,分别为13.44%~16.42%(平均:15.59%)、0.72%~3.60%(平均:2.93%); MgO 和全碱含量(ALK)含量较低,分别为0.45%~0.72%(平均:0.57%)、6.46%~8.00%(平均:7.24%); K_2O/Na_2O 除17CL564点大于1外,其余点为0.19~0.81,平均值为0.59,与沙滩脚岩体的相似。里特曼指数较沙滩脚岩体的小,为1.67~2.96,平均值为2.28。然而,我们本次测试的2个样品铝饱和指数(A/CNK)小于1.1,平均值为0.75,与前人(刘绍锋等,2013)的铝饱和指数(1.2~1.4,平均:1.3)不同。

桂花冲岩体比沙滩脚、姚家岭岩体的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量略低,分别为63.06%~65.96%(平均:64.72%)和12.92%~16.34%(平均:15.14%); TFe_2O_3 含量略高,为2.41%~4.14%(平均:3.11%); MgO 含量(0.54%~1.31%,平均:0.84%)低于沙滩脚岩体而高于姚家岭岩体;全碱含量(ALK)(2.79%~9.16%,平均:6.81%)、 K_2O/Na_2O 比值(0.07~0.68,平均:0.49)和里特曼指数(0.35~3.54,平均:2.23)略低于前两个岩体;铝饱和指数(A/CNK)(0.93~1.06,平均:0.90)低于姚家岭岩体而高于沙滩脚岩体。

3个岩体样品在铝饱和指数分类图解中(Maniar et al., 1989)均落入准铝质区域,仅有3个样

品(刘绍锋等,2013)落入过铝质区域(图5a)。在 K_2O-SiO_2 岩浆岩系列判别图解中,样品主要集中在高钾钙碱性区域(Rickwood,1989)(图5b),以上特征表明,沙滩脚矿田内的中酸性侵入岩主要为准铝质,属高钾钙碱性系列。

(2) 稀土微量元素

沙滩脚岩体的稀土总量(ΣREE)为 85.99×10^{-6} ~ 205.15×10^{-6} ,平均为 155.97×10^{-6} ;轻重稀土比值(LREE/HREE)为11.63~14.82,平均为13.38;(La/Yb)_N为16.74~24.13,平均为20.27,说明该岩体稀土富集而重稀土亏损,轻重稀土分馏明显。 δEu 值为0.78~0.90,呈弱的负Eu异常。

姚家岭岩体的稀土总量(123.21×10^{-6} ~ 182.2×10^{-6} ,平均: 159.44×10^{-6})与沙滩脚岩体的相似,轻重稀土比值(11.67~17.99,平均:15.5)、(La/Yb)_N值(14.41~30.76,平均:23.52)的变化范围和平均值比沙滩脚岩体的大;但 δEu 值(0.74~0.86,平均:0.79)略小于沙滩脚岩体。

桂花冲岩体的稀土总量(127.26×10^{-6} ~ 209.19×10^{-6} ,平均: 175.02×10^{-6})、轻重稀土比值(=12.97~18.01,平均:15.72)、(La/Yb)_N值(19.54~38.94,平均:26.72)和 δEu 值(0.75~0.96,平均:0.84)均高于沙滩脚、姚家岭岩体。

总体上,3个岩体的稀土元素球粒陨石标准化配分模式呈右倾型,轻稀土富集而重稀土亏损,具有较弱的负Eu异常(图6a),表现出相似的稀土元素配分特征。微量元素原始地幔标准化图解上,3个

表2 沙滩脚矿田3个岩体岩石化学成分

Table 2 Chemical composition of three plutons in Shatanjiao ore-field

样品编号	10CL	10CL	001-1*	003-1*	013-1*	17CL	17CL	09xqt0	09XQ	09XQ	CL532-2	CL53	GH02	GH02	GH02
	516-2	516-5				564-2	566-2	04*	T008*	T017*		3-2	6-1*	6-4*	6-6*
	沙滩脚岩体					姚家岭岩体					桂花冲岩体				
SiO ₂	65.20	65.18	64.82	64.96	64.59	61.71	64.91	67.78	67.46	67.08	65.96	63.06	64.29	65.40	64.88
TiO ₂	0.42	0.42	0.59	0.61	0.59	0.55	0.44	0.51	0.47	0.53	0.36	0.45	0.50	0.46	0.49
Al ₂ O ₃	15.67	15.89	16.05	16.12	16.06	13.44	15.60	16.18	16.42	16.29	15.45	12.92	16.34	15.12	15.88
Fe ₂ O ₃	1.20	1.43	3.48	2.62	2.75	3.41	0.72	3.48	3.60	3.44	2.41	4.14	2.69	2.89	3.42
MnO	0.02	0.02	0.06	0.06	0.06	0.31	0.06	0.05	0.08	0.06	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
MgO	0.60	0.50	1.89	1.81	0.88	0.72	0.45	0.61	0.48	0.57	0.96	0.54	0.69	1.31	0.73
CaO	3.75	3.94	4.78	5.09	4.94	5.11	4.74	1.16	1.70	1.84	1.77	5.00	4.68	4.56	4.51
Na ₂ O	7.12	4.87	3.90	4.10	4.05	0.19	6.72	3.87	3.85	4.19	6.21	0.18	4.44	4.85	4.22
K ₂ O	2.99	3.88	3.15	2.69	2.75	7.53	1.29	3.12	2.61	2.85	2.94	2.61	3.00	2.83	2.78
P ₂ O ₅	0.17	0.16	0.27	0.26	0.24	0.24	0.19	0.21	0.20	0.23	0.13	0.19	0.22	0.21	0.21
L.O.I	2.69	3.20	0.31	1.00	2.45	6.63	4.78	2.36	2.49	2.24	2.82	8.91	3.07	1.93	2.80
总量	99.83	99.49	99.29	99.30	99.34	99.77	99.89	99.31	99.36	99.32	98.97	97.98	99.96	98.50	100.48
Rb	127.0	89.60	94.80	84.70	70.70	464.6	52.34	107.2	93.30	107.0	85.77	72.92	73.80	65.90	68.70
Ba	824	790	978	759	594	863	145.5	1022	726	937	749	355	861	1213	910
Th	4.43	4.74	8.83	11.40	12.40	10.22	7.66	10.11	10.34	10.55	5.60	7.96	11.10	11.00	10.4
U	1.73	1.84	1.98	3.04	2.73	3.34	1.75	2.17	3.03	3.07	1.52	1.76	2.07	3.16	2.9
Ta	0.64	0.63	1.09	1.01	0.93	0.91	0.80	1.00	0.92	0.94	0.58	0.63	1.17	1.01	1.0
Nb	10.90	10.50	16.10	15.80	15.60	16.90	14.64	15.85	14.38	14.98	10.88	9.86	16.60	15.60	15.4
Sr	652	713	1132	846	2393	161	319	576	451	554	751	299	1027	4083	1033
Zr	172.0	178.0	245.0	211.0	203.0	171.2	181.9	205.7	205.0	204.2	142.8	114.5	213.0	179.0	168.0
Hf	4.89	5.08	5.80	5.28	5.00	4.99	5.43	5.12	5.09	5.08	1.49	1.05	6.03	5.06	4.8
Y	8.62	8.26	21.40	17.80	17.40	20.71	10.67	9.02	12.15	13.86	7.26	14.26	14.10	15.10	14.2
La	17.30	22.20	42.70	42.80	48.70	39.12	31.14	29.75	44.17	39.37	32.04	36.22	43.50	47.40	44.7
Ce	34.80	44.10	86.10	80.90	86.20	77.13	61.00	54.76	79.85	70.10	54.66	66.50	84.40	91.10	80.3
Pr	4.67	5.14	10.80	9.25	9.85	9.06	7.95	6.02	9.05	8.44	6.15	7.77	9.81	10.60	9.4
Nd	18.10	18.80	40.40	33.80	35.60	35.26	30.81	21.54	32.06	30.13	22.81	29.69	36.80	38.90	35.0
Sm	3.49	3.30	7.60	6.07	6.26	5.92	5.04	3.50	5.46	5.12	3.80	5.28	6.08	6.62	5.8
Eu	0.82	0.89	1.78	1.50	1.48	1.34	1.02	0.84	1.35	1.21	1.11	1.39	1.42	1.49	1.4
Gd	2.72	2.57	5.75	4.61	4.66	4.83	3.87	2.43	3.78	3.67	3.06	4.32	4.21	5.14	4.2
Tb	0.34	0.34	0.74	0.60	0.60	0.73	0.50	0.30	0.47	0.46	0.37	0.58	0.62	0.72	0.6
Dy	1.70	1.56	4.10	3.27	3.28	3.67	2.12	1.65	2.40	2.47	1.49	2.79	2.86	3.28	2.8
Ho	0.28	0.26	0.79	0.64	0.62	0.70	0.38	0.33	0.44	0.49	0.24	0.49	0.49	0.56	0.5
Er	0.84	0.78	2.01	1.64	1.61	1.88	1.00	0.90	1.12	1.26	0.71	1.39	1.28	1.43	1.3
Tm	0.11	0.11	0.28	0.23	0.23	0.34	0.17	0.14	0.16	0.18	0.10	0.21	0.20	0.25	0.2
Yb	0.72	0.66	1.83	1.55	1.49	1.95	0.91	0.91	1.03	1.15	0.59	1.33	1.22	1.52	1.2
Lu	0.10	0.09	0.27	0.24	0.22	0.29	0.13	0.14	0.16	0.18	0.14	0.21	0.16	0.18	0.2
A/NK	1.24	1.36	1.63	1.67	1.67	1.59	1.25	1.66	1.79	1.63	1.15	4.13	1.55	1.37	1.60
A/CNK	0.81	0.84	0.87	0.85	0.86	0.76	0.74	1.37	1.34	1.22	0.93	1.06	0.86	0.78	0.88
里特曼指数	4.49	3.34	2.26	2.07	2.08	2.96	2.80	1.93	1.67	2.02	3.54	0.35	2.52	2.58	2.18
K/Na	0.42	0.80	0.81	0.66	0.68	38.92	0.19	0.81	0.68	0.68	0.47	14.29	0.68	0.58	0.66
Nb/Ta	17.0	16.7	14.8	15.6	16.8	18.6	18.2	15.9	15.6	15.9	18.8	15.6	14.2	15.5	14.8
Rb/Sr	0.19	0.13	0.08	0.10	0.03	2.88	0.16	0.19	0.21	0.19	0.11	0.24	0.07	0.02	0.07
Sr/Y	75.6	86.3	52.9	47.5	138	7.78	29.9	63.8	37.1	30.0	103	21.0	72.8	270	72.8
ΣREE	85.99	100.8	205.2	187.1	200.8	182.2	146.0	123.2	181.5	164.2	1273	158.2	193.1	209.2	187.4
LREE	79.18	94.43	189.4	174.3	1881	167.8	137.0	116.4	171.9	154.4	120.6	146.9	182.0	196.1	176.5
HREE	6.81	6.37	15.77	12.78	12.71	14.39	9.09	6.80	9.56	9.86	6.70	11.32	11.04	13.08	10.9
LRE/HRE	11.63	14.82	12.01	13.64	14.80	11.67	15.07	17.12	17.99	15.66	18.01	12.97	16.49	14.99	16.1
La _N /Yb _N	17.24	24.13	16.74	19.81	23.44	14.41	24.43	23.45	30.76	24.56	38.94	19.54	25.58	22.37	27.2
δEu	0.78	0.90	0.79	0.83	0.80	0.74	0.68	0.83	0.86	0.81	0.96	0.87	0.81	0.75	0.8

注:主量元素主量元素单位为%;稀土及微量元素单位为10⁻⁶;带*样品数据为前人研究数据,其中沙滩脚岩体数据来自吴星星等(2011),姚家岭岩体数据来自刘绍锋等(2013),桂花冲岩体数据来自岳紫龙等(2015)。

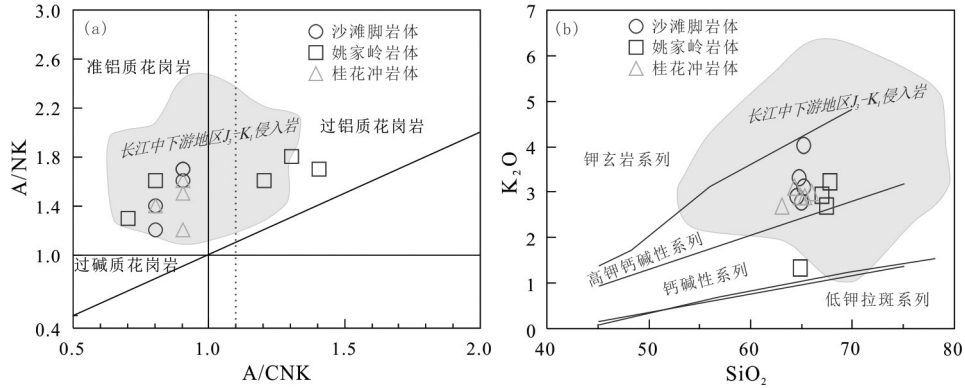


图5 A/NK - A/CNK 图解(a)(据 Maniar et al.,1989)和 K₂O - SiO₂ 图解(b)(据 Rickwood,1989)
 (图中浅灰色区域代表长江中下游地区 J₃-K₁ 侵入岩,据 Wu et al.,2018)

Fig.5 Diagrams of A/NK - A/CNK (a)(after Maniar et al.,1989)and K₂O - SiO₂ (b)(after Rickwood, 1989)

(The gray area in the Figure represents the J₃-K₁ granitoid rocks in the middle and lower reaches of the Yangtze River,after Wu et al., 2018)

岩体均表现出相对富集 Rb、Th、U、La, 亏损 Nb、Ta 等元素的特征(图 6b), 微量元素特征较为相似, 但也存在一些差别。3 个岩体中, 沙滩脚岩体 Sr 含量变化较大, 为 $652 \times 10^{-6} \sim 2393 \times 10^{-6}$, 平均为 1147×10^{-6} ; 姚家岭岩体 Sr 含量则相对低一些, 为 $161.2 \times 10^{-6} \sim 575.8 \times 10^{-6}$, 平均 412.1×10^{-6} ; 桂花冲岩体的 Sr 含量最高, 为 $299 \times 10^{-6} \sim 4083 \times 10^{-6}$, 平均 1438×10^{-6} 。三者的 Y 含量则较为接近, 沙滩脚岩体 Y 含量为 $8.26 \times 10^{-6} \sim 21.4 \times 10^{-6}$, 姚家岭岩体 Y 含量为 $9.0 \times 10^{-6} \sim 20.7 \times 10^{-6}$, 桂花冲岩体 Y 含量为 $7.3 \times 10^{-6} \sim 15.1 \times 10^{-6}$ 。由于上述 3 个岩体中 Sr 含量的差别, 所以它们的 Sr/Y 比值也呈现出明显的差别, 桂花冲岩体 Sr/Y 比值最高(20.98~270.4, 平均 108.09), 其次为沙滩脚岩体(47.5~137.5, 平均 80.0), 姚家岭岩体

Sr/Y 含量最低(7.78~63.84, 平均 35.71)。沙滩脚 Rb/Sr 比值(0.03~0.19, 平均 0.11)与桂花冲(0.016~0.244, 平均 0.102)相近, 而姚家岭的则相对较高(0.16~2.88, 平均 0.73)。

沙滩脚岩体 Nb 含量($10.5 \times 10^{-6} \sim 16.1 \times 10^{-6}$, 平均 13.8×10^{-6})与桂花冲岩体($9.9 \times 10^{-6} \sim 16.6 \times 10^{-6}$, 平均 13.7×10^{-6})比较接近, 低于姚家岭岩体 Nb 含量($14.4 \times 10^{-6} \sim 16.9 \times 10^{-6}$, 平均 15.3×10^{-6})。3 个岩体的 Ta 含量则非常接近, 沙滩脚岩体为 $0.6 \times 10^{-6} \sim 1.1 \times 10^{-6}$, 平均 0.9×10^{-6} ; 桂花冲岩体为 $0.58 \times 10^{-6} \sim 1.17 \times 10^{-6}$, 平均 0.89×10^{-6} ; 姚家岭岩体为 $0.8 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-6}$, 平均 0.91×10^{-6} 。受 Nb 含量的影响, 沙滩脚岩体 Nb/Ta 比值(14.77 ~ 17.03, 平均 16.18)与桂花冲岩体比较接近(14.19 ~ 18.79, 平均 15.77), 低于姚家

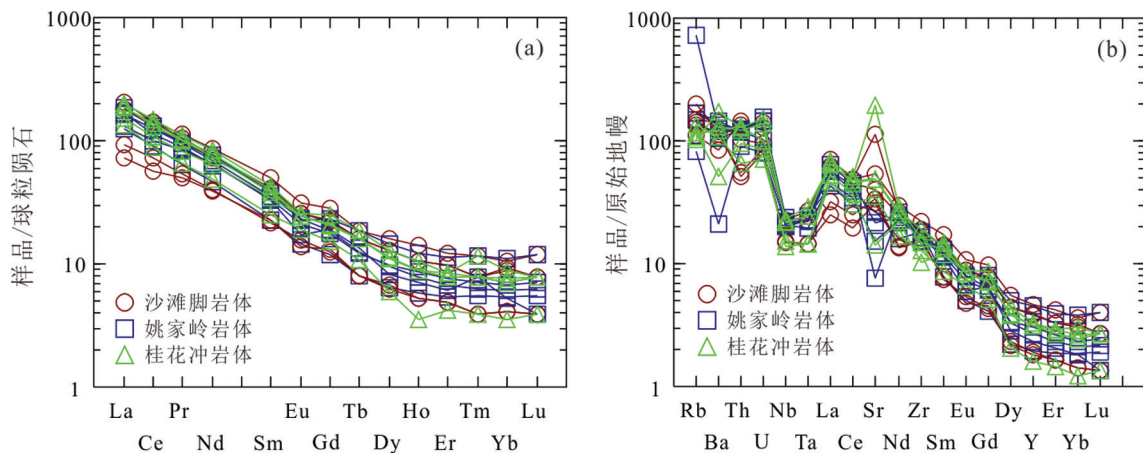


图6 稀土元素球粒陨石标准化配分模式(a)和微量元素蛛网图(b)(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and trace elements spider diagram (b) (after Sun and McDonough, 1989)

岭岩体(15.63~18.63,平均16.85)。

5 讨 论

5.1 岩体形成时代及岩石成因类型

根据前人研究结果,铜陵矿集区七大矿田中,铜官山矿田内中酸性岩体的形成时代为137.5~141.8 Ma(徐夕生等,2004;吴才来等,2010b);狮子山矿田内中酸性侵入岩的形成时代为132.4~140.9 Ma(吴才来等,2008;徐晓春等,2008);新桥头中酸性岩体的形成时代为141.6~147.2 Ma(吴才来等,2013;宋扬等,2017);凤凰山矿田内中酸性侵入岩的形成时代为132.2~144.2 Ma(瞿泓滢等,2010;吴才来等,2013),可见,铜陵地区中酸性侵入岩的形成时代为132.2~147.2 Ma。在本文研究区内,前人获得沙滩脚岩体的形成时代为141.4~144.1 Ma(吴星星等,2011;吴才来等,2013),姚家岭岩体的形成时代为140.7~141.0 Ma(刘绍锋等,2013;钟国雄等,2014;刘建敏等,2014),桂花冲岩体的形成时代约为138.3 Ma(岳紫龙等,2015),而本次研究获得姚家岭岩体的年龄为140.4~140.9 Ma,与前人的研究结果一致。结合区域上中酸性侵入岩的形成时代,我们认为,沙滩脚矿田内3个岩体的形成时代均为早白垩世,并且沙滩脚岩体的形成时代相对较早,其次为姚家岭岩体,桂花冲岩体的形成时代相对较晚。因此,它们可能是同一期岩浆活动先后侵位的产物。

研究表明,S型花岗岩中常含有白云母、堇青石、石榴子石等富铝矿物,A/CNK常大于1.1,呈过铝质, K_2O 常大于 Na_2O (Sylvester,1998)。I型花岗岩中常含有角闪石、磷灰石、榍石等矿物,A/CNK通常小于1.1。沙滩脚、姚家岭及桂花冲岩体的矿物组成相似,主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母及角闪石等矿物组成,副矿物为磷灰石、锆石及磁铁矿,均不含白云母、堇青石、钛铁矿等矿物,具有I型花岗岩的矿物组合特征。研究区3个岩体地球化学样品中除姚家岭岩体15CL264样品及桂花冲岩体15CL533样品由于钾化导致 K_2O 含量大于 Na_2O 含量外,其余样品 K_2O/Na_2O 为0.19~0.81,平均值为0.62,均小于1,显示出富 Na_2O 的特征。3个岩体的里特曼指数小于3(平均值为2.5),属于钙碱性系列;在 SiO_2-K_2O 判别图解上,样品点主要集中在高钾钙

碱性区域,大部分样品的铝饱和指数A/CNK(平均为0.9)均小于1.1,属于准铝质岩石。另外,岩体的 SiO_2 和 P_2O_5 呈负相关关系,也表现出I型花岗岩的地球化学特征。从稀土微量元素地球化学特征来看,沙滩脚、姚家岭和桂花冲岩体富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,表现出I型弧岩浆的地球化学特征。上述岩相学及地球化学特征表明,沙滩脚矿田内的3个中酸性侵入体属于I型花岗岩。

5.2 物质来源及成因机制

根据Sr的地球化学属性,Sr主要在岩浆结晶分异的早期富集。岩石地球化学特征显示,沙滩脚、姚家岭和桂花冲岩体的Sr平均含量分别为 1147×10^{-6} 、 412.06×10^{-6} 和 1438×10^{-6} ,显示高Sr的特点($Sr > 400 \times 10^{-6}$),大于上、下陆壳Sr含量的平均值(300×10^{-6}),说明形成研究区3个中酸性侵入体的岩浆物质可能与幔源岩浆有关。根据Nb、Ta的地球化学属性,在岩浆演化过程中虽然Nb和Ta的含量均会增加但Ta比Nb增加的速度快,因此随着岩浆分异演化的进行,早期岩浆具有更高的Nb/Ta比值。研究区3个岩体的Nb/Ta平均值分别为16.18、16.85和15.77,略低于幔源岩石的平均值(17.5 ± 2),远高于陆壳岩石的平均值(约为11),也说明研究区3个岩体的岩浆物质来源于幔源岩浆,同时可能有少量壳源物质的加入,这与前人对整个铜陵地区侵入岩的研究结果一致(岳元珍等,1986;吴才来等,2003,2008,2013;谢建成等,2008)。

3个岩体均具有高硅,高铝,亏损Y及重稀土的特征,3个岩体的Sr/Y比值分别为47.53~137.53(平均值79.93)、7.79~39.96(35.69)和20.92~270.40(平均值107.96),显示出埃达克岩的特征,但所有样品的MgO含量极低,分别为0.50%~1.89%、0.48%~0.70%与0.50%~1.00%,又与埃达克岩具有很大的不同。埃达克岩可以形成于多种构造环境,只不过在不同构造环境下,埃达克岩形成的深度不同。岛弧环境下俯冲的大洋中脊拉斑玄武岩板片部分熔融可以形成埃达克岩,加厚的基性下地壳熔融也可以形成埃达克岩,既可以产生于板块消减带环境,也可以产生于陆内环境。近年来,众多学者对铜陵地区埃达克质岩的成因进行了研究。有人认为这些埃达克质岩石是由经历蚀变的洋壳部分熔融形成的(Ling et al., 2009, 2011; Sun et al., 2010),另有学

者认为铜陵埃达克质岩是由下地壳减薄或拆沉作用引起的部分熔融而形成的(张旗等,2001; Xu et al., 2002; 王彦斌等, 2004a, 2004b, 2004c; Wang et al., 2006, 2007)。根据王强等(2008)的研究,火山弧环境中常出现埃达克质岩-高镁安山岩-富Nb玄武质岩组合,它的形成可能与板片熔融以及熔体-地幔橄榄岩的相互作用有关,而造山带伸展垮塌环境(如大别山)中埃达克质岩会伴随有镁铁质-超镁铁质岩浆出露。根据Wu et al. (2017)对铜陵地区侵入岩的研究结果,高镁安山岩常与地幔橄榄岩受到板片熔融混染后部分熔融形成的埃达克岩有关,由于铜陵地区缺少这类安山岩,因此,该地区侵入岩不是板片熔融形成的。同时,根据前人研究,扬子克拉通中的基底变质岩(Gao et al., 1999)以及大别造山带源于下地壳的埃达克质花岗岩(Liu et al., 2010; Li et al., 2013),显著亏损Nd同位素组成,这也与铜陵地区侵入岩体具有富集的Nd同位素特征完全不同(Wu et al., 2017)。此外,本文3个岩体的Th/U比值分别为2.59~4.40(平均值3.60)、3.09~4.66(平均值3.83)和3.44~5.29(平均值4.10),明显低于下地壳和大别造山带由下地壳熔融形成的埃达克质岩石(3~50)(Ling et al., 2011)。因此,这3个岩体可能不是直接由下地壳减薄或板片熔融引起的岩浆作用形成,这些岩体的岩浆物质属于地幔和地壳物质的混合。

3个岩体的地球化学特征表明,它们均具有富SiO₂、Al₂O₃、Na₂O的特点,均属于高钾钙碱性岩石系列;富集大离子亲石元素,亏损高场强元素;三者的微量及稀土元素配分模式图基本一致,说明它们可能具有相似的成因,可能是同源岩浆分异演化的产物。因此结合前人的研究成果,笔者认为研究区3个岩体的形成过程是:受到古太平洋板块向欧亚板块俯冲作用的影响,中国东部上地幔发生部分熔融而形成了大量来源于富集地幔的碱性玄武质岩浆,岩浆上升至莫霍面附近(40~50 km)富集形成深位岩浆房,其中的岩浆发生结晶分异作用,形成堆积岩,由于岩浆房本身的热量和结晶潜热,导致岩浆房上部的低熔点组分部分熔融,形成的岩浆在浅部形成长英质岩浆房,来自深位岩浆房分异后的岩浆上升到浅位岩浆房发生岩浆混合,形成一系列的高钾钙碱性中酸性侵入岩(Wu et al., 2014, 2017)。随

着区域构造应力的减弱,研究区构造环境进一步伸展,中酸性岩浆分期侵位,在138~144 Ma内,依次侵位形成沙滩脚、姚家岭、桂花冲中酸性侵入岩体。

5.3 构造环境及地质意义

研究区内沙滩脚、姚家岭、桂花冲岩体均富集Rb、Th、U、La等元素,亏损Nb、Ta等元素,显示出弧岩浆的特征,然而在广泛使用的Pearce(1984)构造环境判别图解上,3个岩体集中在火山弧花岗岩区域(图7)。根据Roberts等(1993)的研究,Pearce等(1984)提出的基于花岗岩类微量元素含量判别花岗岩构造环境的图解只能判别原岩形成的大地构造背景,并不能判断产生这些花岗岩类岩浆时的大地构造背景,也就是说时代较老的原岩形成时的构造背景与原岩部分熔融产生花岗质岩浆时的构造环境并不相同。因此,虽然研究区3个岩体在Pearce构造环境图解中均位于火山弧花岗岩区域内,但这3个岩体可能并不是火山弧花岗岩。

吴淦国等(2008)认为,铜陵地区在中三叠世至晚三叠世时期处于挤压的构造环境,在侏罗纪处于松弛的构造环境,在早白垩世处于碰撞后的伸展环境。笔者认为,中国东南部在晚侏罗世至早白垩世完成了由古特提斯构造域向环太平洋构造域的转换,这一时期,古太平洋板块开始向欧亚板块俯冲并引发了大规模构造-岩浆活动(Ames et al., 1996; 毛景文等, 2005; 窦志娟等, 2015)。根据地球物理研究成果,扬子板块(31~33 km)比大别造山带(41 km)和江南造山带(37 km)薄5~10 km(Wang et al., 2000; Zhang et al., 2000a, 2000b),也说明这一地区至少发生了地幔物质的上涌(吕庆田等, 2003)。根据吕庆田等(2015)的研究,从中侏罗世开始长江中下游地区的构造体制逐渐受控于古太平洋板块向华南大陆NW向低角度俯冲的应力体系,整个华南地区处于陆内造山阶段。由于华北板块和大别地块的阻挡,长江中下游地区地壳强烈变形,岩石圈增厚。从晚侏罗世至早白垩世,由于古太平洋板块俯冲应力减弱,区域构造环境转换为伸展环境,增厚岩石圈拆沉,软流圈物质上涌,引起长江中下游地区发生大规模岩浆活动,正是由于岩石圈拆沉引起的岩浆活动,可能形成了长江中下游矿集区一系列矿床的形成。

由于中国东部地区在晚侏罗世至早白垩世属

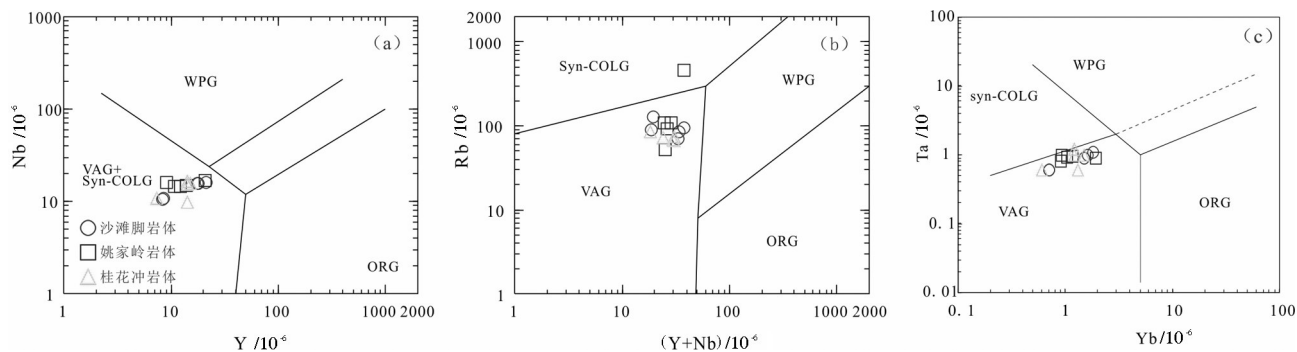


图7 沙滩脚、姚家岭与桂花冲岩体构造环境判别图解(据 Pearce et al.,1984)

Fig.7 Nb VS. Y, Rb VS.(Y+Nb)、Ta VS. Y discrimination diagrams (after Pearce et al., 1984)

于太平洋构造域,环太平洋板块在这一时期对欧亚板块的俯冲作用导致华南板块和扬子板块向北西方向位移,这一时期的大规模构造运动,形成了大量的断裂带,如郟庐断裂等(Li et al., 2014)。与此同时,这些构造带下面的岩石圈可能也发生了多次拆沉作用(Wu et al., 2014, 2017)。Wu et al. (2017)认为在 152 Ma 之前,岩石圈发生了第一次拆沉作用,造成了岩石圈地幔的部分熔融并形成基性岩浆,基性岩浆上升到壳幔过渡带形成深部岩浆房。同时,由于深部岩浆房带有巨大的热量,导致上覆地壳低熔点组分发生部分熔融形成花岗质浅位岩浆房。伴随着断裂构造的切割加深,深位岩浆房中分异的中基性岩浆上升到浅位岩浆房,发生强烈的岩浆混合作用,形成了 140 Ma 左右的中酸性侵入岩。第二次岩石圈拆沉发生在 135 Ma,华南地区岩石圈持续减薄,深部壳幔过渡带深位岩浆房向上迁移,其中基性岩浆直接喷出地表形成火山盆地,随着晚期岩浆喷发强度减弱,迁移到浅部的深部岩浆房诱发浅部地壳部分熔融,形成 A 型花岗岩 (Zhao et al., 2007, 2015; Li et al., 2008, 颜代蓉等, 2012; Huang et al., 2013; 吴才来等, 2016; Wang et al., 2016)。第三次拆沉作用可能发生在 114 Ma 左右,规模小于前两次,形成一些浅成侵入岩体。因此,根据本文研究的 3 个侵入岩体的年代学和地球化学数据,笔者认为,沙滩脚矿田侵入岩和铜陵地区其他侵入岩一样,都是对古特提斯构造域向环太平洋构造域转换的响应,形成于碰撞后的伸展环境。

如前所述,本文研究的 3 个岩体形成时代略有不同,岩体的规模、矿化特征均存在较大的差别。其中沙滩脚岩体规模较大,不同部位采集的样品定

年结果不同,可能反映了岩体由多次脉动式侵位形成,形成的矿体产于岩体与围岩接触带的矽卡岩中;姚家岭岩体地表出露面积较小,但深部范围较大,岩体中包裹了巨大的下二叠统栖霞组碳酸盐岩捕虏体,矿体产在捕虏体中的层间破碎带及捕虏体与岩体的接触带上;而桂花冲岩体规模更小,可能是与沙滩脚、姚家岭岩体同源的岩浆最后侵入形成的,铜金矿体部分产于岩体内部,具有典型的斑岩型细脉-浸染状矿化特征,反映岩浆分异作用的晚期产生了大量的成矿流体(常印佛等, 2017),导致了这种矿化特征。因此,笔者认为沙滩脚矿田深部仍具有较大的找矿潜力,特别是要注意寻找姚家岭式和桂花冲矽卡岩-斑岩型的矿床。

6 结论

(1) 锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果显示,姚家岭岩体的形成年龄为 140.4~140.9 Ma。沙滩脚、姚家岭及桂花冲岩体是幔壳源混合岩浆分期侵位的产物,其中沙滩脚岩体侵位相对较早,姚家岭岩体次之,桂花冲岩体侵位相对较晚。

(2) 沙滩脚矿田内 3 个岩体均属于高钾钙碱性、准铝质岩石,均富集 Rb、Th、U、La、LREEs 等元素,亏损 Nb、Ta、HREEs 等元素,稀土配分模式为右倾式,具有弱的负 Eu 异常,是幔源与壳源岩浆混合后的岩浆分异演化形成的 I 型中酸性侵入岩。

(3) 3 个岩体是中国东部由古特提斯构造域向环太平洋构造域转换的产物,形成于早白垩世的伸展环境,是源于富集地幔的碱性玄武质岩浆与地壳易熔组部分熔融形成的长英质岩浆混合后分期侵位形成。

References

- Ames Leslie, Zhou Gaozhi, Xiong Baocheng. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons, central China[J]. *Tectonics*, 15(2):472-489.
- Chang Yinbo, Liu Xuegui. 1983. On strata-bound skarn deposits[J]. *Mineral Deposits*, (1):13-22 (in Chinese with English abstract)
- Chang Yinbo, Pei Rongfu, Hou Zengqian, Yang Zhushen. 2017. Geochemical dataset of the Shizishan magmatic fluid system in the Tongling ore concentration area, Anhui Province[J]. *Geology in China*, 44(S1): 49-55(in Chinese with English abstract).
- Chu Guozheng, Cao Fenyang. 2000. A discussion on the major control factors of the metallogenic belt around the Yangtze River in Anhui[J]. *Geology of Anhui*, 10(1):35-43 (in Chinese with English abstract)
- Chu Guozheng. 1999. The copper, gold and polymetallic mineralization series and their mutual relationship around the river in Anhui[J]. *Geology of Anhui*, 9(1):45-53 (in Chinese with English abstract)
- Corfu F. 2003. Atlas of zircon textures[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1):469-500.
- Di Yongjun, Wu Ganguo, Zhang Da, Song Biaozang, Wen Shuan, Zhang Zhongyi, Li jinwen. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Xiaotongguanshan and Shatanjiao intrusive rocks from Tongling and their petrological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6):804 (in Chinese).
- Dou Zhijuan, Yang Zhuliang, Chen zhihong, Zhang Baosong. 2015. Geochronology and significance of Lishui Basin (SUB) volcanic rocks of the Yangtze River metallogenic belt[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 35(2):25-31(in Chinese with English abstract).
- Gao Shan, Ling Wenli, Qiu Yumin, Lian Zhou, Hartmann G, Simon K. 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for Cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anataxis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63:2071-2088.
- Han Changsheng, Zhong Guoxiong. 2013. Geological characteristics and genesis of Shatanjiao ore field in Tongling ore district, Anhui[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 36(12):1504-1510(in Chinese with English abstract).
- He Liuchang. 2018. Analysis of buried rock masses and deep prospecting potential in the southwestern Shatanjiao area in the Tongling ore deposit cluster[J]. *Geology of Anhui*, 28(2):114-118 (in Chinese with English abstract).
- Huang Huiqing, Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian. 2013. Intraplate crustal remelting as the genesis of Jurassic high-K granites in the coastal region of the Guangdong Province, SE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74:280-302.
- Huang Wenming. 2016. Analysis of geological characteristics and ore controlling factors of the copper polymetallic deposit in Hanling County, Anhui Province[J]. *Geology of Anhui*, 26(3):182-188(in Chinese with English abstract).
- Lei Min, Wu Cailai, Gao Qianming, Guo Heping, Liu Lianggen, Guo Xiangyan, Gao Yuanhong, Chen Qilong, Qin Haipeng. 2010. Petrogenesis of intermediate-acid intrusive rocks and enclaves, and application of mineral thermobarometry[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 29(3):271-288 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Johnston S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 134:98-136.
- Li Jianwei, Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Vasconcelos P, Ma Changqian, Deng Xiaodong, Souza Z S, Zhao Yongxin, Wu Gang. 2008. Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, eastern Yangtze craton, Eastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints[J]. *Mineralium Deposita*, 43(3):315-336.
- Li Mingze, Wu Cailai, Lei Min, Gao Yuanhong, Wang Nan. 2016. Zircon U-Pb geochronology of intermediate-acid intrusions in the Shujiadian ore district of the Tongling ore concentration Area[J]. *Geology in China*, 43(5):1514-1544(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, Wang Xuance, Gao Yuya. 2013. Revisiting the "C-type adakites" of the lower Yangtze River Belt, central eastern China: In-situ zircon Hf-O isotope and geochemical constraints[J]. *Chemical Geology*, 345:1-15.
- Li Xiaohui, Yuan Feng, Zhang Mingming, Jiang Qisheng, Han Changsheng, Huang Jianman, Zhang Shuhong, Zhong Guoxiong. 2016. 3D spatial quantitative analysis of alteration in Yaojialing zinc-gold polymetallic deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2):390-398(in Chinese with English abstract).
- Ling M X, Wang F Y, Ding X, Hu Y H, Zhou J B, Zartman R E, Yang X Y, Sun W D. 2009. Cretaceous ridge subduction along the lower Yangtze River belt, eastern China[J]. *Economic Geology*, 104:303-321.
- Ling Mingxing, Wang Fangyue, Ding Xing, Zhou Jibin, Sun Weidong. 2011. Different origins of adakites from the Dabie Mountains and the Lower Yangtze River Belt, eastern China: Geochemical constraints[J]. *International Geology Review*, 53(5/6): 727-740.
- Liu Jianmin, Yanjun, Li Quanzhong, Liu Xiaoqiang, Xie Jiancheng. 2014. Zircon dating and petrogenesis of the Yaojialing intrusion in Tongling area [J]. *Chinese Journal of Geology*, 49(2): 494-512(in Chinese with English abstract).
- Liu Shaofeng, Du Yangsong, Fu Shuixing, Zhong Hong, Cao Yi. 2013. U-Pb age and Hf isotopic characteristics of zircons from granodiorite porphyry in the Yaojialing Zn-Au-polymetallic mine, Anhui Province and their geological significance[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, (S1):91-102(in Chinese with English abstract).

- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochun, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-north China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537-571.
- Lou Jinwei. 2012. Intermediate-Acid Intrusive Rocks of Tongling Ore District and Copper-Polymetallic Deposits of Shizishan Ore-Field, Anhui Province[D]. Hefei University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Dong Shuwen, Tang Jingtian, Shi Danian, Chang Yinuo. 2015. Multi-scale and integrated geophysical data revealing mineral systems and exploring for mineral deposits at depth: A synthesis from SinoProbe-03[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(12): 4319-4343 (in Chinese with English abstract).
- Lu Qingtian, Hou Zengqian, Zhao Jinhua, Shi Danian, Wu Xuanzhi, Chang Yinuo, Pei Rongfu, Huang Dongding, Ni Zhaoyang. 2003. Deep seismic reflection profiles to reveal the complex crustal structure of the Tongling ore cluster region[J]. *China Science Series D: Earth Sciences*, 33(5): 442-449 (in Chinese).
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, Li Xiaofeng, Zhang Tianqing, Li Yongfeng. 2005. Mesozoic largescale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169-188 (in Chinese with English abstract).
- Meng Xiangjin, Lu Qingtian, Yang Zhusen, Xu Wenyi. 2011. Geochemical characteristics of Mesozoic intermediate-acid intrusive rocks in Tongling and adjacent area of the middle and lower Reaches of the Yangtze River and its indication to the deep-seated magmatism[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 757-777 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N BW, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Jour. Petrol.*, 25(4): 956-983.
- Qu Hongying, Pei Rongfu, Li Jin wen, Wang Yonglei. 2010. SHRIMP U-Pb dating of Zircon from the Fenghuangshan quartz monzodiorite and granodiorite in Tongling Area, Anhui Province and its geological implication[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(3): 581-590 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247-263.
- Roberts M P, Clemens J D. 1993. Origin of high-potassium, tacks-alkaline, I-type granitoids[J]. *Geology*, 21: 825-828.
- Song Yang, Du Yangsong, Zhang Zhiyu, Ma hong, Zhu Xiaoqiang. 2017. Petrography and U-Pb zircon geochronology of the Jitou pluton in the Xinqiao Cu-S-Fe deposit, Tongling Area, Anhui Province, and its geological significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(1): 33-40.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and Processes[C]/Saunders A D, Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313-345.
- Sun Weidong, Ling Mingxing, Yang Xiaoyong, Fan Weiming, Ding Xing, Liang Huaying. 2010. Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: An overview[J]. *Science China Earth Sciences*, 53(4): 475-484.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45: 29-44.
- Tian Shihong, Du Yangsong, Qin Xinlong, Li Xuanju, Jin Shang Zhong, Yin Jinwu, Li Zanxi. 2001. Mineral inclusion studies of intermediate-acid intrusive rocks and their rock enclaves in Tongling Area, Anhui Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(4): 422-428 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunyong, Zeng Rongsheng, Mooney W D, Hacker B R. 2000. A crustal model of the ultrahigh-pressure Dabie Shan orogenic belt, China, derived from deep seismic refraction profiling[J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(B5): 10857-10869.
- Wang Guochang, Jiang Yaohui, Liu Zheng, Ni Chunyu, Qing Long, Zhang Qiao, Zhu Shuqi. 2016. Multiple origins for the Middle Jurassic to Early Cretaceous high-K calc-alkaline I-type granites in northwestern Fujian Province, SE China and tectonic implications[J]. *Lithos*, 246: 197-211.
- Wang Qiang, Wyman D A, Xu Jifeng, Jian Ping, Zhao Zhenhua, Li Chaofeng, Xu Wei, Ma Jinlong, He Bin. 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(10): 2609-2636.
- Wang Qiang, Wyman D A, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, Jian Ping, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei, Li Chaofeng F, Bai Zhenghua. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization [J]. *Lithos*, 89(3/4): 424-446.
- Wang Qiang, Xu jifeng, Zhao zhenhua, Zifeng, Tang gongjian, Jia Xiaohui, Jiang Ziqi. 2008. Tectonic Setting and Associated Rock Suites of Adakitic Rocks[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(4): 344-350.
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Meng Yifeng, Zeng Pusheng, Yang Zhusen, Tian Shihong. 2004c. SHRIMP U-Pb geochronology of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling ore district, Anhui[J]. *Geology in China*, 31(2): 169-173 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, Yang Zhusen, Meng Yifeng,

- Tian Shihong. 2004a. SHRIMP U–Pb geochronology of Xiaotongguanshan quartz–dioritic intrusions in Tongling district and its petrogenetic implications[J]. *Acta Petrol. Mineral.*, 23(4): 298–304 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, Yang Zhusen, Tian Shihong. 2004b. SHRIMP U–Pb geochronology of gabbro–diorite in the Chaoshan gold deposit and its geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(4): 423–427 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuanlong, Wang Yan, Zhang Qi, Jia Xiuqin, Han Song. 2004. The geochemical characteristics of mesozoic intermediate–acid intrusives of the Tongling area and its metallogenesis–geodynamic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 325–338 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Chen Songyong, Shi Rendeng, Hao Meiyong. 2003. Origin and features of the Mesozoic intermediate–acid intrusive in the Tongling Area, Anhui, China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(1): 41–48 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Guo Heping, Guo Xiangyan, Gao Qianming, Liu Lianggen, Chen Qilong, Lei Min. 2008. Zircon SHRIMP U–Pb dating of Intermediate–acid intrusive rocks from Shizishan, Tongling and the Deep processes magmatism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1801–1812 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Robinson P T, Frost B R, Gao Yuanhong, Lei Min, Chen Qilong, Qin Haipeng. 2014. Petrogenesis of high–K, calc–alkaline and shoshonitic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province (eastern China), and their tectonic implications[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 126(1/2): 78–102.
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Wang Lutai, Lei Min, Wu Di. 2016. The discovery of the syenogranite with an age of 126 Ma in the depth of Tongling: Evidence from 3000 meters scientific drilling[J]. *Geology in China*, 43(5): 1495–1513 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Wu Di, Zhang Xin, Ernst W G. 2017. Late Mesozoic High–K calc–alkaline magmatism in Southeast China: The Tongling example[J]. *International Geology Review*, 60(11/14): 1326–1360.
- Wu Cailai, Gao Qianming, Guo Heping, Guo Xiangyan, Liu Lianggen, Gao Yuanhong, Lei Min, Qin Haipeng. 2010a. Petrogenesis of the intermediate–acid intrusive rocks and zircon SHRIMP dating in Tongling, Anhui, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2630–2652 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Gao Qianming, Guo Heping, Liu Lianggen, Guo Yuanhong, Lei Min, Qin Haipeng, Liu Chunhua, Li Mingze, Chen Qilong. 2010b. Zircon SHRIMP Dating of Intrusive Rocks from the Tongguashan Ore–Field in Tongling, Anhui, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1746–1758 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Guo Xiangyan, Wang Cisiong, Wu Xiuping, Gao Yuanhong, Lei Min, Qin Haipeng, Liu Chunhua, Li Mingze, Chen Qilong. 2013. Age of high–K calc–alkaline intrusions from Tongling and tectonic setting[J]. *Geochimica*, 42(1): 11–28 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Wang Zhihong, Qiao Dewu, Li Haibing, Hao Meiyong, Shi Rendeng. 2000. Types of enclaves and their features and origins in intermediate–acid intrusive rocks from the Tongling District, Anhui, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(1): 54–67.
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, Zhang Chenghuo, Xu Sheng, Guo Heping, Chen Siyou. 1997. Enclave petrology of intermediate–acid intrusive rocks in Tongling District, Anhui[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(2): 71–80 (in Chinese with English abstract).
- Wu Ganguo, Zhang Da, Di Yongjun, Zang Wenshuan, Song Biao, Zhang Zhongyi. 2008. Zircon SHRIMP dating and their tectonic settings of intrusive rocks in Tongling ore concentration area[J]. *Scientia Sinica Terrae*, (5): 630–645.
- Wu Xingxing, Yan Jun, Tang Yulun, Chu Xiaoqiang, Peng Ge. 2011. Geochronology and geochemistry of Shatanjiao granodiorite from Tongling, Anhui Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(1): 75–82 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U–Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569.
- Xie Jiancheng, Yang Xiaoyong, Du Jianguo, Sun Weidong. 2008. Zircon U–Pb geochronology of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling region: Implications for copper–gold Mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1782–1800 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jifeng, Shinjo R, Defant M J, Wang Qiang, Rapp P T. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. *Geology*, 30(12): 1111–1114.
- Xu Xiaochun, Lu Sanming, Xie Qiaozhen, Bo Lin, Chu Guozheng. 2008. SHRIMP zircon U–Pb dating for the magmatic rocks in Shizishan ore–field of Tongling, Anhui Province, and its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 500–509 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Fan Qincheng, O’Reilly S Y, Jiang Shaoyong, Griffin W L, Wang Rucheng, Qiu Jiansheng. 2014. Zircon U–Pb dating of the quartz diorite and its enclaves in Tongguanshan, Anhui province: Discussion on the petrologic genesis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1883–1891 (in Chinese).
- Yan Dairong, Deng Xiaodong, Hu Hao, Li Jianwei. 2012. U–Pb age and petrogenesis of the Ruanjiawan granodiorite pluton and Xiniushan granodiorite porphyry, southeast Hubei Province: Implications for Cu–Mo mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28: 3373–3388 (in Chinese with English abstract).
- Yin Yanduan, Hong Tianqiu, Jia Zhihai, Zhao Huan, Li Chao, Luo Lei, Huang Jianman. 2016. The Re–Os age of molybdenite and ore–forming material source from the Yaojialing Zn–Au polymetallic

- deposit, Tongling[J]. *Geological Reviews*, 62(1):248–256.
- Yue Yuanzhen, Shi Hongqi, Wang Xiaoping, Liu Zongquan, Shi Jiuming. 1986. Mineralogical characteristics of neutral–acidic intrusive rock in Tongling, and some suggestions on their Origin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, (2):134–150(in Chinese with English abstract).
- Yue Zilong, Du Yangsong, Cao Yi, Cao Yi, Zuo Xiaomin, Zhang Aiping, Huang Wenming. 2015. Geochemical features and U–Pb age of the Guihuachong granodiorite porphyry in Tongling and their geological implications[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 35(1):82–90(in Chinese with English abstract).
- Yue Zilong, Du Yangsong, Caoyi, Zuo Xiaomin, Zhang Aiping. 2016. Alteration and mineralization of the Guihuachong porphyry copper deposit, Tongling Area, Anhui Province[J]. *Geoscience*, 30(1):50–58(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Lin Xinduo, Jin Fuquan, Zhou Xunruo, Wan Tianfeng, Zhou Zonggui. 1992. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the middle and lower valley of the Yangtze River[J]. *Mineral Deposits*, (1):1–12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, Yang Jinhui. 2012. The characteristics and tectonic–metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4):236–244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhongjie, Wang Guangjie, Teng Jiwei, Klemperer S. 2000b. CDP mapping to obtain the fine structure of the crust and upper mantle from seismic sounding data: An example for the southeastern China[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 122(1/2):133–146.
- Zhang Zhongjie, Li Yingkan, Lu Deyuan, Teng Jiwen, Wang Guangjie. 2000a. Velocity and anisotropy structure of the crust in the Dabieshan orogenic belt from wideangle seismic data[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 122(1–2):115–131.
- Zhao Zifu, Gao Peng, Zheng Yongfei. 2015. The source of Mesozoic granitoids in South China: Integrated geochemical constraints from the Taoshan batholith in the Nanling Range[J]. *Chemical Geology*, 395:11–26.
- Zhao Zifu, Zheng Yongfei, Wei Chunsheng, Wu Yuanbao. 2007. Post collisional granitoids from the Dabie orogen in China: Zircon U–Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust[J]. *Lithos*, 93(3/4):248–272.
- Zhong Guoxiong, Zhou Taofa, Yuan Feng, Jiang Qisheng, Fan Yu, Zhang Dayu, Huang Jianman. 2014. LA–ICPMS U–Pb zircon age and molybdenite Re–Os dating of Yaojialing large zinc–gold polymetallic deposit, Tongling, Anhui Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4):1075–1086(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xunruo, Wu Cailai, Huang Xuchen, Zhang Chenghuo. 1993. Characteristics of cognate inclusions in intermediate–acid intrusive rocks of Tongling Area and their magmatic Dynamics[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (1):20–31(in Chinese with English abstract).
- 常印佛, 刘学圭. 1983. 关于层控式矽卡岩型矿床——以安徽省内扬子拗陷中一些矿床为例[J]. *矿床地质*, (1):13–22.
- 常印佛, 裴荣富, 侯增谦, 杨竹森. 2017. 安徽省铜陵矿集区狮子山岩浆流体系统地球化学测试数据集[J]. *中国地质*, 44(S1):49–55.
- 储国正, 曹奋扬. 2000. 安徽沿江成矿带主要控制因素的探讨[J]. *安徽地质*, 10(1):35–43.
- 储国正. 1999. 安徽沿江地区铜金多金属矿化系列及相互关系[J]. *安徽地质*, (1):45–53.
- 狄永军, 吴淦国, 张达, 宋彪斌, 文拴, 张忠义, 李进文. 2005. 铜陵地区小铜官山和沙滩脚岩体锆石 SHRIMP U–Pb 年代学研究及其岩石学意义[J]. *地质学报*, 79(6):660–660.
- 窦志娟, 杨祝良, 陈志洪, 张宝松. 2015. 长江中下游成矿带溧水盆地(次)火山岩的年代学及其意义[J]. *矿物岩石*, 35(2):25–31.
- 韩长生, 钟国雄. 2013. 铜陵矿集区沙滩脚矿田矿床地质特征及成因[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 36(12):1504–1510.
- 何柳昌. 2018. 铜陵矿集区沙滩脚西南地区隐伏岩体及深部找矿潜力分析[J]. *安徽地质*, 28(2):114–118.
- 黄文明. 2016. 安徽省南陵县桂花冲铜多金属矿床地质特征及控矿因素分析[J]. *安徽地质*, 26(3):182–188.
- 雷敏, 吴才来, 高前明, 国和平, 刘良根, 郭祥炎, 郜源红, 陈其龙, 秦海鹏. 2010. 铜陵地区中酸性侵入岩及其包体的成因和矿物温压计的应用[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(3):271–288.
- 李名则, 吴才来, 雷敏, 郜源红, 王楠. 2016. 铜陵矿集区舒家店矿区内酸性侵入岩锆石 U–Pb 年代学研究[J]. *中国地质*, 43(5):1514–1544.
- 李晓晖, 袁峰, 张明明, 蒋其胜, 韩长生, 黄建满, 张淑虹, 钟国雄. 2016. 姚家岭锌金多金属矿床围岩蚀变三维空间定量分析研究[J]. *岩石学报*, 32(2):390–398.
- 刘建敏, 闫峻, 李全忠, 宋传中, 刘晓强, 谢建成. 2014. 铜陵姚家岭岩体的锆石定年和岩石成因[J]. *地质科学*, 49(2):494–512.
- 刘绍锋, 杜杨松, 付水兴, 钟宏, 曹毅. 2013. 安徽姚家岭锌金多金属矿区花岗闪长斑岩锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 38(1):91–102.
- 楼金伟. 2012. 安徽铜陵矿集区中酸性侵入岩及狮子山矿田铜多金属矿床[D]. 合肥: 合肥工业大学.
- 吕庆田, 董树文, 汤井田, 史大年, 常印佛. 2015. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统、助力深部找矿——长江中下游深部探测(SinoProbe–03)进展[J]. *地球物理学报*, 58(12):4319–4343.
- 吕庆田, 侯增谦, 赵金花, 史大年, 吴宣志, 常印佛, 裴荣富, 黄东定, 匡朝阳. 2003. 深地震反射剖面揭示的铜陵矿集区复杂地壳结构形态[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 33(5):442–449.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 2005(1):171–190.
- 孟祥金, 吕庆田, 杨竹森, 徐文艺. 2011. 长江中下游铜陵及邻区中生代中酸性侵入岩地球化学特征及其深部岩浆作用探讨[J]. *地质学报*, 85(5):757–777.

- 瞿泓滢, 裴荣富, 李进文, 王永磊. 2010. 安徽铜陵凤凰山石英二长闪长岩和花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(3):581-590.
- 宋扬, 杜杨松, 张智宇, 马宏, 朱晓强. 2017. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁矿床矾头岩体的矿物学和锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地质科技情报, 36(1):33-40.
- 田世洪, 杜杨松, 秦新龙, 李铨具, 金尚中, 尹京武, 李赞熙. 2001. 安徽铜陵地区中酸性侵入岩及其岩石包体中的矿物包裹体研究[J]. 地学前缘, 8(4):422-428.
- 王强, 许继峰, 赵振华, 资锋, 唐功建, 贾小辉, 姜子琦. 2008. 埃达克质岩的构造背景与岩石组合[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(4):344-350.
- 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 田世洪. 2004a. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的年龄及其成因指示[J]. 岩石矿物学杂志, 23(4):298-304.
- 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004b. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的时代——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 地球学报, 25(4):423-427.
- 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 曾普胜, 杨竹森, 田世洪. 2004c. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义[J]. 中国地质, 32(2):169-173.
- 王元龙, 王焰, 张旗, 贾秀琴, 韩松. 2004. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿——地球动力学意义[J]. 岩石学报, 20(2):325-338.
- 吴才来, 陈松永, 史仁灯, 郝美英. 2003. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因[J]. 地球学报, 24(1):41-48.
- 吴才来, 董树文, 国和平, 郭祥炎, 高前明, 刘良根, 陈其龙, 雷敏, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C. 2008. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程[J]. 岩石学报, 24(8):1801-1812.
- 吴才来, 董树文, 王陆太, 王次松, 雷敏, 吴迪. 2016. 铜陵矿集区深部发现 126 Ma 的正长花岗岩:来自 3000m 科学钻探的证据[J]. 中国地质, 43(5):1495-1513.
- 吴才来, 高前明, 国和平, 郭祥炎, 刘良根, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 陈其龙. 2010b. 铜陵地区铜官山矿田侵入岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 地质学报, 84(12):1746-1758.
- 吴才来, 高前明, 国和平, 郭祥炎, 刘良根, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏. 2010a. 铜陵中酸性侵入岩成因及锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 26(9):2630-2652.
- 吴才来, 郭祥炎, 王次松, 武秀平, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花, 李名则, 陈其龙. 2013. 铜陵地区高钾钙碱性系列侵入岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地球化学, 42(1):11-28.
- 吴才来, 周珣若, 黄许陈, 张成火, 许胜, 国和平, 陈思友. 1997. 铜陵地区中酸性侵入岩的包体岩石学研究[J]. 地球学报, 18(2):71-80.
- 吴淦国, 张达, 狄永军, 臧文拴, 张祥信, 宋彪, 张忠义. 2008. 铜陵矿集区侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其深部动力学背景[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 38(5):630-645.
- 吴星星, 闫峻, 唐裕禄, 初晓强, 彭戈. 2011. 安徽铜陵沙滩脚岩体年代学及地球化学特征[J]. 矿物岩石, 31(1):75-82.
- 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 孙卫东. 2008. 铜陵地区中生代侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及 Cu-Au 成矿指示意义[J]. 岩石学报, 24(8):1782-1800.
- 徐夕生, 范钦成, O'Reilly S Y, 蒋少涌, Griffin W L, 王汝成, 邱检生. 2004. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石 U-Pb 定年与成因探讨[J]. 科学通报, 49(18):1883-1891.
- 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 柏林, 储国正. 2008. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其成因意义[J]. 地质学报, 82(4):500-509.
- 颜代蓉, 邓晓东, 胡浩, 李建威. 2012. 鄂东南地区阮家湾和犀牛山花岗岩闪长岩的时代、成因及成矿和找矿意义[J]. 岩石学报, 28(10):3373-3388.
- 殷延端, 洪天求, 贾志海, 赵欢, 李超, 罗雷, 黄建满. 2016. 铜陵姚家岭锌金多金属矿的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及成矿物质来源[J]. 地质论评, 62(1):248-256.
- 岳元珍, 史鸿歧, 王小平, 刘宗权, 史久明. 1986. 铜陵地区中酸性侵入岩的矿物特征及成岩条件初析[J]. 矿物岩石, 6(2):132-148.
- 岳紫龙, 杜杨松, 曹毅, 左晓敏, 张爱萍, 黄文明. 2015. 铜陵桂花冲花岗岩闪长斑岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿物岩石, 35(1):82-90.
- 岳紫龙, 杜杨松, 曹毅, 左晓敏, 张爱萍. 2016. 安徽铜陵桂花冲斑岩铜矿围岩蚀变与矿化作用[J]. 现代地质, 30(1):50-58.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 金福全, 周珣若, 万天丰, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究[J]. 矿床地质, (1):1-12.
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17(2):236-244.
- 钟国雄, 周涛发, 袁峰, 蒋其胜, 范裕, 张达玉, 黄建满. 2014. 安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成岩成矿年代学研究[J]. 岩石学报, 30(4):1075-1086.
- 周珣若, 吴才来, 黄许陈, 张成火. 1993. 铜陵中酸性侵入岩同源包体特征及岩浆动力学[J]. 岩石矿物学杂志, (1):20-31.