

宁镇地区成矿斑岩与铁镁质包体铜同位素研究*

张力钰¹ 刘盛遨^{1**} 赵盼捞¹ 汪方跃²

ZHANG LiYu¹, LIU ShengAo^{1**}, ZHAO PanLao¹ and WANG FangYue²

1. 中国地质大学,北京 100083

2. 合肥工业大学资源与环境工程学院,合肥 230009

1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2014-10-12 收稿, 2015-01-18 改回.

Zhang LY, Liu SA, Zhao PL and Wang FY. 2015. A comparative study of copper isotopic composition between ore-bearing porphyries and mafic xenoliths in the Ningzhen area. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7):1908–1916

Abstract The origin of porphyry copper deposits in the Middle-Lower Yangtze River has been controversial for a long time. This paper aims to track the source of ore-bearing porphyries and associated mafic xenoliths by using high-precision Cu isotopic analysis of a series of Mesozoic plutons in the Ningzhen area. The results show a wide range of $\delta^{65}\text{Cu}$ of Anjishan dioritic porphyries from -0.13% to $+0.36\%$ and a homogeneous Cu isotopic composition of the gabbro xenoliths from $+0.14\%$ to $+0.19\%$. $\delta^{65}\text{Cu}$ of the Tongshan porphyries are in the range of $+0.03\%$ to $+0.36\%$, and gabbro xenoliths are from $+0.10\%$ to $+0.20\%$. $\delta^{65}\text{Cu}$ of granodiorite in Xiangshan pluton is $+0.20\% \pm 0.06\%$ and $\delta^{65}\text{Cu}$ value of the gabbro xenolith is $+0.16\% \pm 0.06\%$. Overall, $\delta^{65}\text{Cu}$ values of porphyries from the three plutons exhibit a relatively large range; however, $\delta^{65}\text{Cu}$ of gabbro xenoliths cluster between $+0.1\%$ and $+0.2\%$, with an average value of $+0.15\% \pm 0.05\%$, consistent with the mantle value ($+0.07\% \pm 0.10\%$). Previous studies show that the ore-bearing porphyries in Ningzhen have high MgO, high $\text{Mg}^\#$ values and low radiogenic Pb isotopic compositions, and that ancient lower crustal rocks commonly show variable Cu isotopic compositions. Thus, the genesis of the ore-bearing porphyries and the origin of copper in these deposits might be best explained by magma mixing between the magmas derived from metasomatized mantle and melts originated from old lower continental crust.

Key words Mineralization-related porphyries; Mafic xenoliths; Cu isotopes; Magma source; Ningzhen area

摘要 长江中下游地区成矿斑岩的成因及铜矿中铜的来源一直受到争议。寻找斑岩铜矿中铜的来源归根结底是限定其寄主岩的成因。本文拟通过测定宁镇地区一系列中生代岩体的成矿斑岩及其铁镁质包体的 Cu 同位素组成,来探究成矿斑岩中 Cu 的来源。测定结果显示,安基山闪长斑岩 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值为 $-0.13\% \sim +0.36\%$;其辉长岩包体 $\delta^{65}\text{Cu}$ 的值为 $+0.14\% \sim +0.19\%$ 。铜山成矿斑岩 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值为 $+0.03\% \sim +0.36\%$;其辉长岩包体 $\delta^{65}\text{Cu}$ 的值为 $+0.10\% \sim +0.20\%$ 。象山花岗闪长岩 $\delta^{65}\text{Cu}$ 为 $+0.20\% \pm 0.06\%$;其辉长岩包体 $\delta^{65}\text{Cu}$ 为 $+0.16\% \pm 0.06\%$ 。三个岩体成矿斑岩 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值为 $-0.13\% \sim +0.36\%$,变化范围较大;而辉长岩包体 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值均在 $+0.1\% \sim +0.2\%$ 之间,平均 $\delta^{65}\text{Cu}$ 为 $+0.15\% \pm 0.05\%$,与地幔 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值($+0.07\% \pm 0.10\%$)吻合。结合前人对研究区成矿斑岩高 MgO、 $\text{Mg}^\#$ 值,低放射性成因 Pb 同位素组成,以及古老下地壳来源的岩石具有较大的 Cu 同位素组成变化的认识,我们认为宁镇地区成矿斑岩及成矿物质主要为幔源岩浆和古老下地壳部分熔融岩浆混合成因。

关键词 成矿斑岩;铁镁质包体;Cu 同位素;岩浆来源;宁镇地区

中图法分类号 P595

* 本文受国家自然科学基金项目(41473017)、高校基本科研业务费(2-9-2014-068)和大学生创新实验项目(2013111415007)联合资助。

第一作者简介: 张力钰,女,1992年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: zhangly228@163.com

** 通讯作者: 刘盛遨,男,1984年生,副教授,同位素地球化学研究方向, E-mail: lsa@cugb.edu.cn

1 引言

斑岩型铜矿是最重要的金属 Cu-Au-Mo-Ag 成矿类型之一,其中世界铜产量的一半来自斑岩型铜矿。中国中东部长江中下游地区是中国最重要的金属成矿带之一,发育大规模中生代斑岩型矿床,但其铜矿石中铜(及其它金属)的来源一直颇受争议。解决斑岩铜矿中铜的来源问题归根结底是限定其寄主岩的成因。

长江中下游成矿斑岩主要为中酸性的埃达克质岩石。基于前人大量研究,其成因主要可归为以下四种观点:(1)长江中下游一带的中酸性火山岩和侵入岩产于板内环境,是玄武岩浆底侵到加厚下地壳底部导致下地壳中-基性岩部分熔融形成(张旗等,2001,2002);(2)王强等(2001)根据 Sr-Nd 同位素等地球化学特征认为中国东部安徽沙溪等地燕山期侵入岩的成因是底侵玄武质下地壳岩石部分熔融;(3)部分学者认为可能是拆沉下地壳部分熔融,并与地幔相互作用的结果,其中岩浆中铜的富集与岩浆结晶分异有关(Xu *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006; 王强等, 2004);(4) Liu *et al.* (2010)、Wang *et al.* (2013,2014)根据熔体高氧逸度,以及通过与庐庐断裂带不含矿高镁埃达克岩地球化学对比提出了俯冲洋壳部分熔融模型。其中,俯冲洋壳熔融是环太平洋地区斑岩的主要成矿模型(Sajona and Maury, 1998; Sun *et al.*, 2010),幔源岩浆底侵和熔融是西藏地区新生代斑岩成矿作用比较流行的观点(Hou *et al.*, 2004)。

目前 S、Pb、Re-Os、Rb-Sr 同位素和稀土元素等已经被广泛应用于示踪金属成矿物质来源(Lambert *et al.*, 1999; 吴开兴等, 2002; 丁振举等, 2003; 王立强等, 2010)。比如通过研究成矿矿物或包裹体的 S、Pb 同位素能够示踪成矿流体的来

源,从而示踪成矿金属的源区。这是基于不同的储库(如上地幔 vs. 下地壳; 岩浆岩 vs. 沉积地层)具有不同的 Pb 或 S 同位素组成。尽管在示踪成矿流体和成矿物质来源方面已经得到了广泛的应用,但与 Cu 同位素相比, S 和 Pb 同位素在成矿物质示踪方面的作用是间接的,这显示了 Cu 同位素在这一应用领域的优越性。

铜同位素是近年来兴起的一种非传统同位素测试方法,研究发现铜同位素在低温成矿过程中能够发生显著的分馏,但在高温下分馏很有限(Li *et al.*, 2009; 王跃和朱祥坤, 2010),这极大地限制了 Cu 同位素在高温过程中的应用。最近, Liu *et al.* (2014a)通过高精度的 Cu 同位素分析发现,硅酸盐标样的 Cu 同位素组成是不均一的($-0.01‰ \sim +0.39‰$),其变化范围(0.40‰)是长期外部重现性的大约 8 倍。因为高温下成矿物质的起源与岩浆作用直接相关,这一发现有望应用 Cu 同位素示踪成矿物质的源区,从而为 Cu 同位素示踪成矿物质来源开辟一个新的领域。目前为止,关于斑岩铜矿铜同位素的研究主要集中在成矿矿石中含铜矿物(硫化物)Cu 同位素的时空分布研究(Mathur *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010),而很少应用到直接示踪斑岩铜矿中铜的来源。本文拟通过测定宁镇地区成矿斑岩及其铁镁质包体的 Cu 同位素组成,对比二者之间的同位素组成是否存在差异,推断成矿斑岩和铁镁质包体的源区,从而验证 Cu 同位素体系可否直接用于示踪成矿斑岩中 Cu 的来源。

2 区域地质背景

长江中下游地区位于扬子板块东北缘,秦岭大别造山带东部,庐庐断裂带东南部,太平洋板块俯冲带西部(图 1)。江苏省宁镇地区位于长江中下游成矿带最东段,是长江中下游

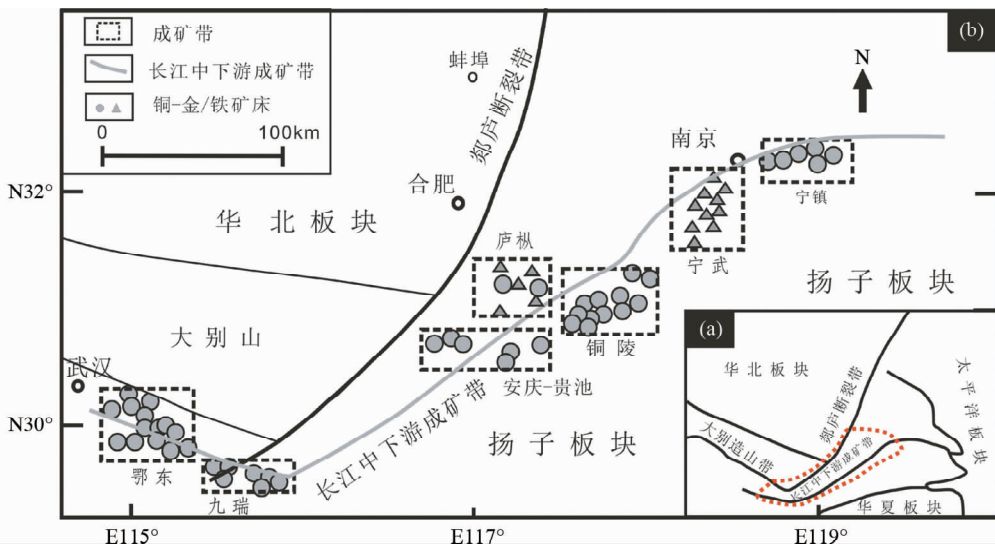


图 1 中国东部长江中下游成矿带地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Middle and Lower Yangtze River Belt in eastern China

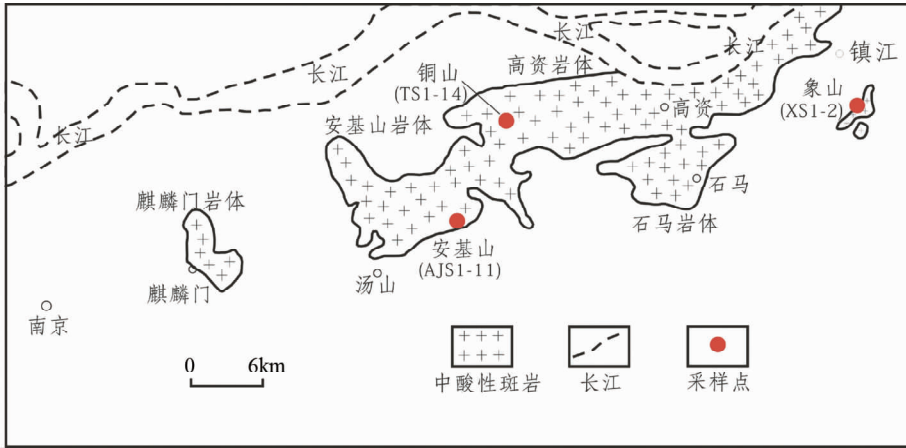


图2 宁镇地区中生代中酸性侵入体及采样点分布图(据许继峰等,2001; Wang *et al.*, 2014 资料修编)

Fig.2 Distribution of Mesozoic intermediate-acidic intrusions and sampling locations in Ningzhen area (after Xu *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2014)

金属成矿带重要组成部分。宁镇地区的地质构造发展可分为三个阶段:晋宁运动以来的扬子地台基底形成阶段,震旦纪到三叠纪的海相、海陆过渡相的碳酸盐岩、陆源碎屑岩系沉积盖层阶段和侏罗纪到白垩纪的陆相红色碎屑岩系和碎屑岩系的叠加盖层阶段(曾键年等,2013)。研究区内构造较复杂,主要可分为中晚三叠-早中侏罗世由于华南陆块和华北陆块碰撞造成的南北向挤压;晚侏罗世-白垩纪燕山期大规模岩浆活动造成的区域伸展;晚白垩世-第三纪由于太平洋板块向西北推进造成的南东向挤压(肖志明,1991)。

长江中下游地区燕山期的成矿作用主要集中在 145 ~ 120Ma 之间且表现出明显的分区性和演化趋势(周涛发等,2008; Zhou *et al.*, 2008),此时期主要可分为三个岩浆喷发事件:(1)145 ~ 135Ma 发生在铜陵地区的钙碱性中酸性侵入岩岩浆喷发;(2)135 ~ 127Ma 发生在断陷区的亚碱性-碱性双峰岩岩浆喷发事件;(3)127Ma 后与金铀矿化有关的 A 型花岗岩岩浆侵入(Wang *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2008; 范裕等, 2008)。

3 岩体及样品特征

江苏宁镇地区广泛发育着中生代的中酸性侵入岩,它们以高资、石马、安基山、麒麟门岩体为代表,通常被称为宁镇岩(基)段(许继峰等,2001)。本文所采样品位于宁镇地区近 EW 向的安基山(AJS)、象山(XS)、铜山(TS)岩体(图2)。安基山岩体沿 NEE 向展布延伸达 10km,最宽处约 4km,面积 40km²。安基山岩体内含有大量的捕虏体,岩石类型主要为石英闪长斑岩和花岗闪长斑岩,石英闪长斑岩分布广泛,主要分布在浅部和东北部的接触带上(王立本等,1997;许继峰等,2001)。曾键年等(2013)测得安基山侵入岩锆石 U-Pb 年龄为 107Ma。铜山位于研究区的西北部,是高资岩体北部的一部分,总体呈 NEE 向延伸。岩石类型主要为石英闪长岩

和斑状石英闪长岩。前人测得铜山主岩体石英闪长岩中黑云母的 K-Ar 年龄为 117Ma(王立本等,1997)。象山岩体靠近镇江,位于镇江南端,研究区的东端。岩石类型主要为花岗闪长斑岩。Wang *et al.* (2014) 测得宁镇地区埃达克质岩石的成岩年龄在 100 ~ 109Ma 之间。

本文进行 Cu 同位素分析的样品主要采自安基山岩体和铜山岩体,少量采自象山岩体。其中安基山样品为 6 个中酸性斑岩和 5 个铁镁质包体,铜山样品为 7 个中酸性斑岩和 6 个铁镁质包体,象山样品为 1 个中酸性斑岩和 1 个铁镁质包体。野外观察发现,除象山样品有微弱的蚀变,安基山和铜山样品都未见明显蚀变。根据烧失量(中酸性斑岩平均烧失量, AJS:2.68%, TS:0.72%, XS:5.11%; 铁镁质包体平均烧失量, AJS:4.76%, TS:4.76%, XS:6.87%; 表 1)和镜下长石蚀变观察(图 3)可看出,总体上铁镁质包体蚀变程度大于中酸性斑岩,象山样品蚀变程度较大,安基山次之,铜山中酸性斑岩几乎无蚀变。

安基山岩体的中酸性斑岩主要为闪长斑岩和石英闪长斑岩,斑状结构,块状构造,基质为斜长石和角闪石,斑晶主要为角闪石(23%),斜长石(7%)和石英(3%)(图 3a)。铁镁质包体为辉长岩,似斑状结构,基质为微晶结构,斑晶为辉石(10%)、角闪石(7%)、斜长石(10%)、石英(3%)(图 3b)。

铜山岩体的中酸性斑岩主要为闪长斑岩和花岗闪长岩,斑状结构,半自形-自形结构,块状构造,主要由长石(65%)、石英(20%)、角闪石(10%)和少量黑云母组成(3%),含少量锆石、磷灰石等副矿物(图 3c)。铁镁质包体为辉长岩,斑状结构,基质为隐晶-微晶结构,基质主要由斜长石和辉石组成,斑晶主要由单斜辉石(7%),角闪石(3%),斜长石(10%)和斜方辉石(2%)组成(图 3d)。

象山岩体的中酸性斑岩为花岗闪长岩,似斑状结构,基质为微花岗结构,基质由长石(55%)、石英(10%)和绿泥

表1 样品的 Cu 同位素组成测定结果 ($\delta^{65}\text{Cu}$: ‰; 主量元素: wt%)Table 1 Cu isotopic composition of analyzed samples ($\delta^{65}\text{Cu}$: ‰; major elements: wt%)

样品号	岩性	$\delta^{65}\text{Cu}_{\text{NBS976}}$	2SD	SiO_2	MgO	LOI
AJS-1	闪长斑岩	+0.28	0.01	57.66	4.87	2.07
AJS-2	石英闪长斑岩	+0.17	0.09	63.32	2.60	1.88
AJS-3	闪长斑岩	-0.13	0.06	56.32	4.34	3.03
AJS-4	石英闪长斑岩	+0.36	0.03	64.42	2.25	1.97
AJS-5	闪长斑岩	+0.32	0.05	54.96	5.95	3.91
AJS-6	闪长斑岩	+0.12	0.09	54.82	5.69	3.25
AJS-7	辉长岩	+0.18	0.01	49.56	5.30	6.23
AJS-8	辉长岩	+0.14	0.05	47.78	7.53	4.84
AJS-9	辉长岩	+0.14	0.07	47.44	8.75	5.16
AJS-10	辉长岩	+0.18	0.07	48.52	8.07	4.66
AJS-11	辉长岩	+0.19	0.04	51.72	6.41	2.91
TS-1	花岗闪长岩	+0.36	0.02	64.34	2.10	0.57
TS-2	花岗闪长岩	+0.35	0.05	63.84	2.43	0.73
TS-3	花岗闪长岩	+0.15	0.03	63.24	2.40	0.64
TS-4	花岗闪长岩	+0.16	0.05	64.58	2.21	0.83
TS-5	花岗闪长岩	+0.22	0.02	66.54	1.96	0.61
TS-6	辉长岩	+0.13	0.04	47.44	8.80	4.06
TS-7	辉长岩	+0.20	0.01	48.62	7.66	5.40
TS-8	辉长岩	+0.10	0.05	47.02	8.84	4.32
TS-9	辉长岩	+0.10	0.06	47.00	9.65	4.47
TS-10	辉长岩	+0.11	0.07	47.74	9.14	4.48
TS-11	辉长岩	+0.14	0.09	46.12	8.68	5.84
TS-12	闪长斑岩	+0.03	0.09	56.92	3.97	0.75
TS-13	闪长斑岩	+0.05	0.03	54.66	5.18	0.93
XS-1	花岗闪长斑岩	+0.20	0.06	54.44	3.74	5.11
XS-2	辉长岩	+0.16	0.06	48.08	8.20	6.87
BHVO-2	玄武岩	+0.14	0.04			

石化的黑云母与角闪石(15%)组成,斑晶由长石(10%),石英(6%)和角闪石(4%)组成(图3e)。铁镁质包体为辉长岩,斑状结构,块状构造,基质由斜长石和辉石组成,基质由辉石(3%),角闪石(5%),斜长石(15%)和石英(2%)组成(图3f)。

4 铜同位素研究

4.1 铜同位素分析方法

铜是过渡族金属元素,是重要的成矿元素。它有两个稳定的同位素: ^{63}Cu 和 ^{65}Cu ,它们在自然界中所占的比例分别为69.17%和30.83%(Shields *et al.*, 1965)。本文研究样品的Cu同位素分析在中国地质大学(北京)同位素地球化学实验室完成。样品的Cu同位素分析主要包括溶样、化学分离提纯和测定,具体实验流程详见Liu *et al.* (2014a)。

4.1.1 溶样

称取约20~40mg样品于Savillex公司生产的6mL聚四氟氟杯中,加入1:1比例的HF和 HNO_3 于160℃电热板上溶

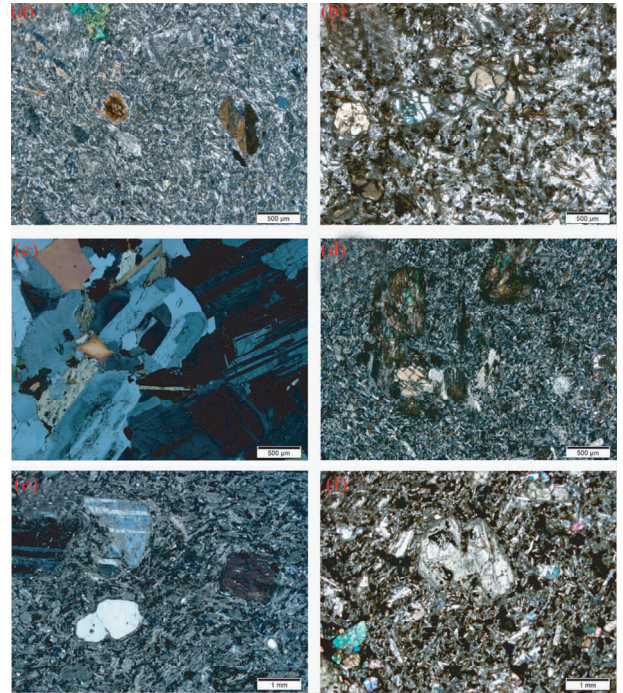


图3 研究区中酸性斑岩与铁镁质包体镜下照片

(a) AJS-6 闪长斑岩;(b) AJS-9 辉长岩;(c) TS-5 花岗闪长岩;(d) TS-7 辉长岩;(e) XS-1 花岗闪长斑岩;(f) XS-2 辉长岩

Fig. 3 Microscopic photographs of intermediate-acidic porphyries and mafic xenoliths in the studied area

解,待溶解后开盖蒸干,再加入王水在80℃电热板上加热,待溶解后开盖蒸干,之后加入少量浓 HNO_3 于120℃加热,反复溶解蒸干至得清澈透明溶液后蒸干,再加入1mL 8N HCl + 0.001% H_2O_2 ,溶解蒸干,重复此过程3次,确保样品转换为氯盐。最后再用1mL 8N HCl + 0.001% H_2O_2 溶解,等待化学分离。

4.1.2 化学分离

化学分离过程使用AG-MP-1M阴离子交换树脂。用0.5N HNO_3 和8N HCl分别交替与MQ H_2O 清洗树脂三次,加入10mL 8N HCl + 0.001% H_2O_2 调节淋洗过程的离子环境,再加入溶解在1mL 8N HCl + 0.001% H_2O_2 中的样品。加入样品后,加入9mL 8N HCl + 0.001% H_2O_2 ,此9mL HCl主要用于淋洗出一些杂质元素(例如Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, Cr, Ni, Mn)。然后,加入28mL 8N HCl + 0.001% H_2O_2 ,并用干净的聚四氟烧杯接收此28mL淋洗后的溶液,准备进行Cu同位素测定。

4.1.3 质谱测定

将化学分离后所得溶液开盖蒸干,然后溶于1mL 3% HNO_3 再蒸干,重复此过程两次,配置相应溶液(100×10^{-9}),进行质谱测定。分析所用的仪器为Thermo-Finnigan Neptune plus型多接收电感耦合等离子质谱仪(MC-ICP-MS)。采用样品-标准-样品交叉法(SSB)校正仪器的质量

分馏。

4.1.4 基质干扰分析

Liu *et al.* (2014a) 研究发现在 Cu 同位素测定过程中, 测试结果主要受 Ti 离子及基团的干扰, 因为 Ti 与 O 结合形成的 $^{16}\text{O}^{47}\text{Ti}$ 和 $^{16}\text{O}^{49}\text{Ti}$ 质量数上等于 ^{63}Cu 和 ^{65}Cu , 而消除此干扰最好的方法就是使样品中 Cu 更加纯化。Liu *et al.* (2014a) 用 BHVO-2 作为测试样品进行检验, 实验表明, 一次过柱后, Ti/Cu 比(质量)为 0.3, 对结果会造成 +0.15‰ 的影响, 两次过柱后 Ti/Cu 降低到 0.03 以下, 在误差范围内不会干扰实验结果。

本文所有硅酸盐样品均经过了两次化学分离, 且在上机测试铜同位素组成之前, 测定了溶液的 Ti/Cu 比, 所有样品 Ti/Cu 比均在 0.03 之下。因此 Ti 离子的基质干扰可以忽略。

4.2 铜同位素测定结果及其分析

4.2.1 Cu 同位素组成表示方法

Cu 同位素比值的测定结果以样品相对于标准样品的千分偏差 $\delta^{65}\text{Cu}$ (采用 NBS976 标准) 表示, 即:

$$\delta^{65}\text{Cu} = [({}^{65}\text{Cu}/{}^{63}\text{Cu})_{\text{样品}} / ({}^{65}\text{Cu}/{}^{63}\text{Cu})_{\text{标准}} - 1] \times 1000$$

4.2.2 测试精度

通过对实验室人工合成溶液样品和 USGS 标准岩石样品的 Cu 同位素长期分析, 外部精度分别优于 $\pm 0.03\text{‰}$ 和 $\pm 0.05\text{‰}$ (2SD)。与文中报道样品进行平行溶解、化学分离和测试的 BHVO-2 标样的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 为 $0.14 \pm 0.04\text{‰}$, 与其他文献中报道的该标样的值在误差范围内一致 (Moynier *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2014a, b; Li *et al.*, 2015)。

4.2.3 样品 Cu 同位素测定结果

将已配好的待测样品溶液放入 MC-ICP-MS 仪器中进行 Cu 同位素测定。每个样品循环测量三次, 取其平均值作为 δ 值, 两倍标准偏差 (2SD) 作为误差值。测得结果如表 1。

测试结果表明, 安基山 (AJS) 闪长斑岩 (包括石英闪长斑岩) $\delta^{65}\text{Cu}$ 的范围为 $-0.13\text{‰} \sim +0.36\text{‰}$, 平均值 $+0.19\text{‰} \pm 0.07\text{‰}$ (2SD); 安基山 (AJS) 辉长岩 $\delta^{65}\text{Cu}$ 的范围为 $+0.14\text{‰} \sim +0.19\text{‰}$, 平均值 $+0.17\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ (2SD)。将安基山样品 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值分别与其 SiO_2 和 MgO 含量投图 (图 4a, b)。岩浆岩的酸度和类型由 SiO_2 含量决定。岩浆结晶分异过程中, 岩浆中 MgO 含量一直呈下降趋势 (黄智龙等, 2003; 孙赫等, 2009), 即 MgO 含量越高, 结晶分异程度越低, 越接近原始岩浆成分。 SiO_2 - $\delta^{65}\text{Cu}$ 图解展示出不同酸度的岩浆的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值特征; MgO - $\delta^{65}\text{Cu}$ 图解展示出不同结晶分异程度的岩浆的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值特征。

铜山 (TS) 花岗闪长岩 $\delta^{65}\text{Cu}$ 的范围为 $+0.15\text{‰} \sim +0.36\text{‰}$, 平均值 $+0.25\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$ (2SD); 闪长斑岩 $\delta^{65}\text{Cu}$ 的范围为 $+0.03\text{‰} \sim +0.05\text{‰}$, 平均值 $+0.04\text{‰} \pm 0.08\text{‰}$ (2SD); 辉长岩 $\delta^{65}\text{Cu}$ 的范围为 $+0.10\text{‰} \sim +0.20\text{‰}$, 平均值

$+0.13\text{‰} \pm 0.05$ (2SD)。图 4c, d 分别为铜山 SiO_2 - $\delta^{65}\text{Cu}$ 和 MgO - $\delta^{65}\text{Cu}$ 图解。

2 个象山 (XS) 样品铜同位素测试结果为花岗闪长斑岩 $\delta^{65}\text{Cu} = +0.20\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$ (2SD); 辉长岩 $\delta^{65}\text{Cu} = +0.16\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$ (2SD)。图 4e, f 分别为象山 SiO_2 - $\delta^{65}\text{Cu}$ 和 MgO - $\delta^{65}\text{Cu}$ 图解。

5 讨论

5.1 宁镇地区成矿埃达克质岩浆起源

长江中下游地区燕山期岩浆岩被广泛认为是埃达克质岩 (张旗等, 2001; 汪洋等, 2004; 李印等, 2009)。埃达克岩是根据高 Sr/Y 和 La/Yb 比值, 不具有明显 Eu 负异常, 低 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值等地球化学特征定义的一套中酸性岩石, 由于缺乏岩石学限定标准, 因此关于其成因机制的观点众多。长江中下游地区燕山期埃达克质岩主要有加厚古老下地壳部分熔融、底侵的玄武质下地壳部分熔融、拆沉下地壳部分熔融和俯冲洋壳四种成因模式。

底侵玄武质下地壳熔融一般产生低 MgO 含量及低 $\text{Mg}^\#$ 的岩浆 (< 0.5), 这与宁镇地区成矿斑岩具有高的 $\text{Mg}^\#$ ($\text{Mg}^\# = \text{molar} [\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})] (0.4 \sim 0.6)$) 不符 (Xu *et al.*, 2002)。虽然新底侵的玄武质下地壳部分熔融的熔体在某些情况下可以解释埃达克质岩的高 MgO 和 $\text{Mg}^\#$ 特征, 比如通过与幔源岩浆发生混合, 但是该模型不能解释宁镇地区成矿斑岩低放射性 Pb 同位素特征, 即无法解释富集地幔源区的轻微较高的 Pb 同位素组成特征。并且热的玄武质成分阻碍了榴辉岩的生成, 而埃达克岩通常被认为形成于榴辉岩部分熔融, 因此排除了宁镇地区“埃达克质”岩的底侵玄武质下地壳熔融成因模型 (Wang *et al.*, 2006; 李印等, 2009)。结合宁镇地区侵入岩高 MgO (1.52% ~ 3.99%)、高 $\text{Mg}^\#$ 和低放射性 Pb 同位素组成 ($(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i < 17$) 的特征, Xu *et al.* (2002) 提出这些成矿斑岩可能起源于拆沉下地壳部分熔融的熔体与地幔橄榄岩的相互作用。

拆沉下地壳部分熔融模型和洋壳俯冲模型都能形成地壳熔体与地幔物质混合产生的岩浆, 能够解释高 $\text{Mg}^\#$ 地球化学特征 (Xu *et al.*, 2002; 孙卫东等, 2008)。然后, 由于陆壳和洋壳元素组成的巨大差异, 拆沉下地壳部分熔融和洋壳俯冲熔体产生的岩浆具有显著不同的化学组成 (Liu *et al.*, 2010; Ling *et al.*, 2011)。最近的研究通过对比长江中下游地区与其南侧郯庐断裂带及大别山同时代埃达克质岩 Hf-O 同位素以及 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 和 Eu/Eu^* 计算出的氧逸度, 发现长江中下游地区成矿斑岩的成因可能与俯冲的大洋板片有关, 而不同于西侧郯庐断裂带及大别山地区加厚下地壳来源的埃达克质岩石 (Liu *et al.*, 2010, 2012; Ling *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2012, 2013; Wang *et al.*, 2013, 2014)。

然而, 宁镇地区成矿斑岩与长江中下游其它地区成矿埃达克质岩存在几个显著的差异 (Wang *et al.*, 2014): (1) 宁镇

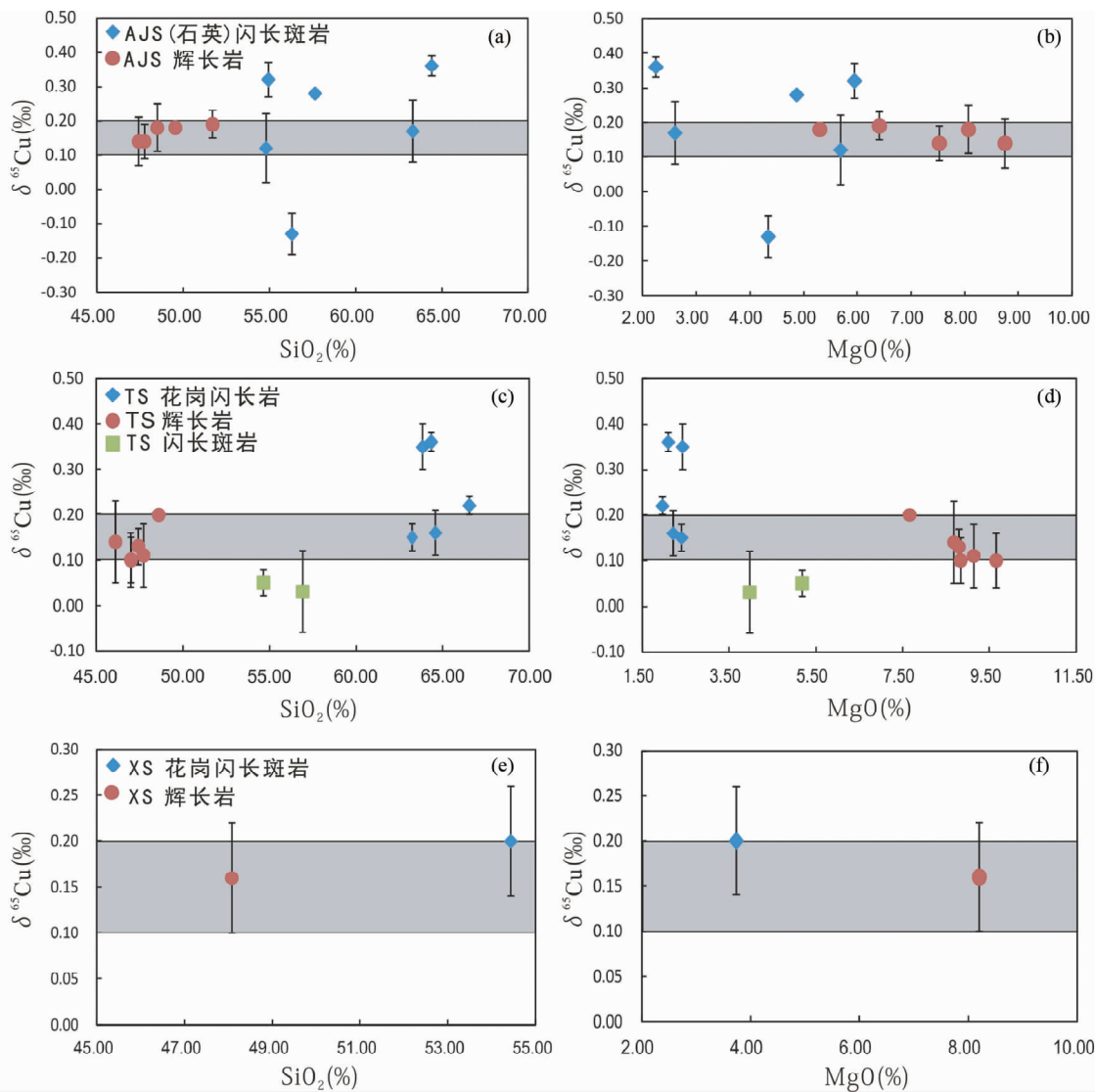


图4 安基山、铜山、象山 $\delta^{65}\text{Cu}$ -MgO 和 $\delta^{65}\text{Cu}$ -SiO₂ 图解

Fig. 4 $\delta^{65}\text{Cu}$ -MgO and $\delta^{65}\text{Cu}$ -SiO₂ diagram of Anjishan, Tongshan and Xiangshan plutons

地区成矿斑岩更年轻 (100 ~ 110Ma); (2) 具有低放射成因 Pb; (3) 氧逸度低; (4) 锆石 Ti 饱和温度低。基于这些差异并结合同期大量基性包体的出现, Wang *et al.* (2014) 提出宁镇地区成矿斑岩起源于富集地幔来源的玄武质岩浆同古老下地壳熔体的混合。

5.2 宁镇地区成矿斑岩及其包体 Cu 同位素对比及其意义

与传统的 S 和 Pb 同位素相比, 限定斑岩铜矿中 Cu 的来源最直接的示踪剂是该金属稳定同位素。尽管在成矿温度下 (200 ~ 300°C), 硫化物沉淀过程中会产生一定的 Cu 同位素分馏, 但在高温岩浆过程中没有观察到显著的 Cu 同位素分馏 (Li *et al.*, 2009)。因此, 应用铜同位素对成矿物质可能来源的硅酸岩源区进行区分是可能的。为此, 我们通过对比宁镇地区成矿斑岩与其铁镁质包体 (幔源) 的 Cu 同位素来

判定成矿岩浆的来源 (壳源、幔源、壳幔混合源), 并进一步判定其主要成因模型。

宁镇地区中酸性斑岩 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值在 $-0.13\text{‰} \sim +0.36\text{‰}$ 范围内, 分馏变化范围较大, 而辉长岩 Cu 同位素组成很集中, $\delta^{65}\text{Cu}$ 值均处于 $+0.1\text{‰} \sim +0.2\text{‰}$ 之间, 平均 $\delta^{65}\text{Cu}$ 为 $+0.15\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ (2SD) (图 5)。总体上看, 辉长岩酸度越大, 结晶分离程度越高, $\delta^{65}\text{Cu}$ 值越重; 中酸性斑岩表现不明显 (图 4, 图 5)。AJS-3 样品 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值为 $-0.13\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$, 与其他中酸性斑岩差别较大。Li *et al.* (2009) 指出, 澳大利亚不同类型的花岗岩, 除去两个受局部热液蚀变影响的样品 $\delta^{65}\text{Cu}$ 达到 1.51‰ 和 0.95‰ 外, 其余花岗岩的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 变化范围为 $-0.46\text{‰} \sim 0.21\text{‰}$, 所研究的花岗岩分布范围很广且具有很宽泛的物质组成和不同的物质来源。

对于宁镇地区的铁镁质包体, 陶维松等 (1987) 早先根据

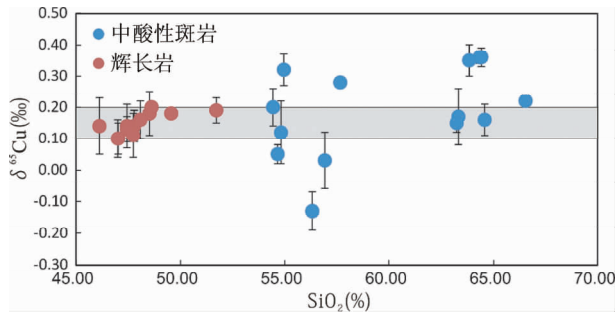


图5 宁镇地区成矿斑岩与辉长岩包体 $\delta^{65}\text{Cu}$ - SiO_2 图解

Fig. 5 $\delta^{65}\text{Cu}$ - SiO_2 diagram of ore-bearing porphyries and gabbro xenoliths in Ningzhen area

仔细的镜下鉴定和主微量元素特征认为其为下地壳碎块,经过了部分熔融的残留体。Wang *et al.* (2014) 认为其来自富集岩石圈地幔的部分熔融。Liu *et al.* (2015) 和 Savage *et al.* (2015) 通过对全球地幔橄辉岩和玄武岩的研究、测得硅酸盐地球(BSE)的 Cu 同位素组成为 $+0.07\text{‰} \pm 0.10\text{‰}$, 代表地幔的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 。本研究所测定的宁镇地区辉长质包体的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值吻合, 支持这些铁镁质包体主要来自富集地幔 (Wang *et al.*, 2014)。

研究表明,花岗质岩浆结晶分异过程中没有显著的 Cu 同位素分馏 (Li *et al.*, 2009), 但理解计算表明岩浆去气可能产生 Cu 同位素分馏 (Seo *et al.*, 2007)。然后, 与火山岩相比, 侵入岩去气作用要弱得多。因此, 花岗质岩浆的 Cu 同位素变化应该反映源区的不均一。相反, 古老下地壳岩石和古老下地壳来源的岩浆岩通常都具有显著的 Cu 同位素变化 ($>2\text{‰}$), 显著不同于玄武岩和普通的年轻下地壳来源的花岗岩。Wang *et al.* (2014) 测得宁镇地区 100 ~ 109Ma 埃达克质岩具有较高的 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 和 Eu/Eu^* 计算出的高氧逸度及较低的锆石 Ti 饱和温度 (大约 650°C), 认为宁镇地区成矿斑岩形成于幔源岩浆和古老下地壳熔体的混合。本文研究的样品均远离矿区, 没有遭受强烈的流体改造作用。因此, 我们认为, 宁镇地区中酸性斑岩不均一的 Cu 同位素组成可能是幔源岩浆和部分熔融的下地壳岩浆的混合的结果, 古老下地壳的熔融解释了较大的 Cu 同位素变化范围, 而幔源岩浆的卷入解释了高 $\text{Mg}^\#$ 和富 MgO 的特征。如果这一解释正确的话, Cu 同位素有望成为一个示踪地幔熔体和古老下地壳熔体贡献的一个重要示踪剂。如何识别地幔熔体和地壳熔体对成矿物质的贡献是一个重要的科学问题, 比如冈底斯成矿带新生代成矿埃达克质岩通常含有大量镁铁质包体, 而成矿物质是来自中酸性斑岩 (埃达克质岩) 还是镁铁质包体代表的幔源岩浆? 我们希望对这些岩石的 Cu 同位素研究能够解决这一重要问题。此外, 在确定斑岩和镁铁质包体存在显著 Cu 同位素差异的基础上, 可以进一步测定成矿斑岩中含铜矿物的 Cu 同位素, 然后与斑岩和铁镁质包体的 Cu 同位素进行对比, 从而示踪铜矿石中铜的来源, 这是 Cu 同位素在高温成矿

过程中最重要的应用, 是今后 Cu 同位素研究的重要方向。

6 结论

本文通过对长江中下游宁镇地区安基山、铜山、象山三个岩体的中酸性斑岩和其中的辉长质包体的 Cu 同位素组成测定, 结果发现:

(1) 三个矿区辉长质包体 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值均在 $+0.1\text{‰} \sim +0.2\text{‰}$ 之间, 平均 $\delta^{65}\text{Cu} = +0.15\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ (2SD), 与地幔 Cu 同位素组成 $+0.07\text{‰} \pm 0.10\text{‰}$ 吻合。结合富集的 Sr-Nd 同位素组成, 我们认为宁镇地区成矿斑岩中辉长质包体主要来源于富集岩石圈地幔。

(2) 三个岩体中酸性斑岩 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值在 $-0.13\text{‰} \sim +0.36\text{‰}$ 之间, 变化范围较大。结合研究区前人研究资料, 宁镇地区中酸性斑岩的高 MgO 、高 $\text{Mg}^\#$ 值和低放射性 Pb 同位素组成的特征, 以及古老下地壳岩石和古老下地壳来源的岩浆岩中 Cu 同位素会有较大变化的 ($>2\text{‰}$) 的认识, 我们认为宁镇地区具有不均一的 Cu 同位素组成的中酸性斑岩主要为幔源岩浆和下地壳部分熔融岩浆混合形成的。

(3) 宁镇地区成矿斑岩及其辉长岩包体的 Cu 同位素的明显差异表明可通过进一步测定成矿含 Cu 矿物的 Cu 同位素组成, 并与斑岩和铁镁质包体的 Cu 同位素进行对比, 从而示踪成矿物质的来源。

致谢 感谢中国地质大学 (北京) 同位素地球化学实验室李丹丹、吕逸文、王泽洲、蒋磊在 Cu 同位素测定实验过程中提供的帮助。感谢黄方教授和另一名匿名审稿人提出的宝贵意见。

References

- Ding ZJ, Yao SZ, Liu CQ, Zhou ZG and Yang GM. 2003. The characteristics of exhalation-sedimentary deposit of Donggouba polymetal deposit: Evidence from ore's REE composition. *Acta Petrologica Sinica*, 19 (4): 792 - 798 (in Chinese with English abstract)
- Fan Y, Zhou TF, Yuan F, Qian CC, Lu SM and Cooke D. 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the A-type granites in the Lu-Zong (Lujiang-Zongyang) area and their geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (8): 1715 - 1724 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Gao YF, Qu XM, Rui ZY and Mo XX. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during Mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220 (1 - 2): 139 - 155
- Huang ZL, Guan T, Xie LH and Xu DR. 2003. Petrological mixing calculation and its application to magma fractional crystallization: A case study of lamprophyres in Baimazhai nickel deposit, Yunnan Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 27 (3): 237 - 242 (in Chinese with English abstract)
- Lambert DD, Foster JG, Frick LR, Li C and Naldrett AJ. 1999. Re-Os isotopic systematics of the Voisey's bay Ni-Cu-Co magmatic ore system, Labrador Canada. *Lithos*, 47 (1 - 2): 69 - 88

- Li DD, Liu SA and Li SG. 2015. Copper isotope fractionation during adsorption onto kaolinite: Experiment approach and applications. *Chemical Geology*, 396: 74 – 82
- Li WQ, Jackson SE, Pearson NJ, Alard O and Chappel BW. 2009. The Cu isotopic signature of granites from the Lachlan Fold Belt, SE Australia. *Chemical Geology*, 258(1–2): 38 – 49
- Li WQ, Jackson SE, Pearson NJ and Graham S. 2010. Copper isotopic zonation in the Northparkes porphyry Cu-Au deposit, SE Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(14): 4078 – 4096
- Li Y, Ling MX, Ding X, Liu J, Han F and Sun WD. 2009. Adakites or adakitic rocks and associated metallogenesis in eastern China. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 448 – 464 (in Chinese with English abstract)
- Ling MX, Wang FY, Ding X, Zhou JB and Sun W. 2011. Different origins of adakites from the Dabie Mountains and the Lower Yangtze River Belt, eastern China: Geochemical constraints. *International Geology Review*, 53(5–6): 727 – 740
- Liu SA, Li SG, He YS and Huang F. 2010. 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
- Liu SA, Li SG, Guo SS, Hou ZH and He YS. 2012. The Cretaceous adakitic-basaltic-granitic magma sequence in south-eastern margin of the North China Craton: Implications for lithospheric thinning mechanism. *Lithos*, 134 – 145: 163 – 178
- Liu SA, Li DD, Li SG, Teng FZ, Ke S, He YS and Lu YH. 2014a. High-precision copper and iron isotope analysis of igneous rock standards by MC-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 29(1): 122 – 133
- Liu SA, Teng FZ, Li SG, Wei GJ, Ma JL and Li DD. 2014b. Copper and iron isotope fractionation during weathering and pedogenesis: Insights from saprolite profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 146: 59 – 75
- Liu SA, Huang J, Liu JG, Wörner G, Yang W, Tang YJ, Chen Y, Tang LM, Zheng JP and Li SG. 2015. Copper isotopic composition of the silicate Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, in press
- Mathur R, Titley S, Barra F, Brantley S, Wilson M, Phillips A, Munizaga F, Maksiav V, Vervoort J and Garret H. 2009. Exploration potential of Cu isotope fractionation in porphyry copper deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 102(1): 1 – 6
- Moynier F, Koeberl C, Beck P, Jourdan F and Telouk P. 2010. Isotopic fractionation of Cu in tektites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(2): 799 – 807
- Sajona FG and Maury RC. 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 326(1): 27 – 34
- Savage PS, Moynier F, Chen H, Shofner G, Siebert J, Badro J and Puchtel IS. 2015. Copper isotope evidence for large-scale sulphide fractionation during Earth's differentiation. *Geochemical Perspectives Letters*, 1: 54 – 64
- Seo JH, Lee SK and Lee I. 2007. Quantum chemical calculations of equilibrium copper (I) isotope fractionations in ore-forming fluids. *Chemical Geology*, 243(3–4): 225 – 237
- Shields WR, Goldich SS, Gamer EL and Murphy TJ. 1965. Natural variations in the abundance ratio and atomic weight of copper. *Journal of Geophysical Research*, 70(2): 479 – 491
- Sun H, Qin KZ, Su BX, Fan X, Tang DM and Li J. 2009. Discovery of komatiitic ultramafic intrusion in Mid-Tianshan terrain: Xiadong intrusion, Xingjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 738 – 748 (in Chinese with English abstract)
- Sun WD, Ling MX, Wang FY, Ding X, Hu YH, Zhou JB and Yang XY. 2008. Pacific plate subduction and Mesozoic geological event in eastern China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 218 – 225 (in Chinese with English abstract)
- Sun WD, Ling MX, Yang XY, Fan WM, 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, Ling MX, Chung SL, Ding X, Yang XY, Liang HY, Fang WM, Goldfarb R and Yin QZ. 2012. Geochemical constraints on adakites of different origins and copper mineralization. *Journal of Geology*, 120(1): 105 – 120
- Sun WD, Liang HY, Ling MX, Zhan MZ, Ding X, Zhang H, Yang XY, Li Y, Ireland TR, Wei QR and Fan WM. 2013. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 103: 263 – 275
- Tao WS, Chen SS and Wu QL. 1987. The characteristics and formation mechanism of the xenoliths of the intermediate-acid magmatic rocks in Ningzhen area. *Jiangsu Geology*, (4): 7 – 12 (in Chinese with English abstract)
- Wang FY, Liu SA, Li SG and He YS. 2013. Contrasting zircon Hf-O isotopes and trace elements between ore-bearing and ore-barren adakitic rocks in central-eastern China: Implications for genetic relation to Cu-Au mineralization. *Lithos*, 156 – 159: 97 – 111
- Wang FY, Liu SA, Li SG, Akhtar S and He YS. 2014. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and trace elements of Mesozoic high Sr/Y porphyry from Ningzhen, eastern China: Constraints on their petrogenesis, tectonic implications and Cu mineralization. *Lithos*, 200 – 201: 299 – 316
- Wang LB, Ji KJ and Chen D. 1997. Re-Os isotope ages of molybdenite from the Anjishan copper deposit and the Tongshan copper-molybdenum deposit and their implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 154 – 159 (in Chinese with English abstract)
- Wang LQ, Gu XX, Cheng WB, Tang JX, Zhong KH and Liu XJ. 2010. Sulfur and lead isotope composition and tracing for the sources of ore-forming materials in the Mengya' a Pb-Zn deposit, Tibet. *Geoscience*, 24(1): 52 – 58 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Xiong XL and Xu JF. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates, Anhui Province, China. *Geochimica*, 30(4): 353 – 362 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Xu JF, Zhao ZH, Bao ZW, Wei X and Xiong XL. 2004. Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of East China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. *Geochemical Journal*, 38(5): 417 – 434
- Wang Q, Zhao ZH, Xu JF, Bai ZH, Wang JX and Liu CX. 2004. The geochemical comparison between the Tongshanou and Yinzu adakitic intrusive rocks in southeastern 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 Y, Deng JF and Ji GY. 2004. A perspective on the geotectonic setting of Early Cretaceous adakite-like rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and its significance for copper-gold mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 297 – 314 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y and Zhu XK. 2010. Applications of Cu isotopes on studies of mineral deposits: A status report. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 739 – 751 (in Chinese with English abstract)
- Wu KX, Hu RZ, Bi XW, Peng JT and Tang QL. 2002. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A review. *Geology-Geochemistry*, 30(3): 73 – 81 (in Chinese with English abstract)
- Xiao ZM. 1991. Mesozoic structural classification and evolution in Ningzhen area. *Jiangsu Geology*, (1): 12 – 17 (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*

Petrologica 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
- Zeng JN, Li JH, Chen JH and Lu PX. 2013. SHRIMP zircon U-Pb dating of Anjishan intrusive rocks in Ningzhen district, Jiangsu, and its geological significance. *Earth Science*, 38(1): 57 – 67 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Zhao TP, Wang Y and Wang YL. 2001. A discussion on the Yanshanian magmatism in eastern China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 273 – 280 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Liu W and Wang YL. 2002. Adakite: Its characteristics and implications. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 431 – 435 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Fan Y, 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 petrogenesis 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)

附中文参考文献

- 丁振举, 姚书振, 刘从强, 周宗桂, 杨明国. 2003. 东沟坝多金属矿床喷流沉积成矿特征的稀土元素地球化学示踪. *岩石学报*, 19(4): 792 – 798
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 钱存超, 陆三明, Cooke D. 2008. 安徽庐江-枞阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 定年及其地质意义. *岩石学报*, 24(8): 1715 – 1724
- 黄智龙, 管涛, 谢力华, 许德如. 2003. 岩石学混合计算在岩浆结晶分异作用研究中的应用——以云南白马寨镍矿区煌斑岩为例. *大地构造与成矿学*, 27(3): 237 – 242
- 李印, 凌明星, 丁兴, 刘健, 韩峰, 孙卫东. 2009. 中国东部埃达克岩及成矿作用. *大地构造与成矿学*, 33(3): 448 – 464
- 孙赫, 秦克章, 苏本勋, 范新, 唐冬梅, 李军. 2009. 中天山地块科马提质超镁铁岩体的发现: 新疆峡东岩体. *岩石学报*, 25(4): 738 – 748
- 孙卫东, 凌明星, 汪方跃, 丁兴, 胡艳华, 周继斌, 杨晓勇. 2008. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件. *矿物岩石地球化学*

通报, 27(3): 218 – 225

- 陶维松, 陈思松, 吴乔良. 1987. 宁镇地区中酸性岩浆岩中的中基性岩石包体的特征及形成机理. *江苏地质*, (4): 7 – 12
- 王立本, 季克俭, 陈东. 1997. 安基山和铜山铜(钼)矿床中辉钼矿的铼-钼同位素年龄及其意义. *岩石矿物学杂志*, 16(2): 154 – 159
- 王立强, 顾雪祥, 程文斌, 唐菊兴, 钟康惠, 刘晓吉. 2010. 西藏蒙亚啊铅锌矿床 S、Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪. *现代地质*, 24(1): 52 – 58
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. *地球化学*, 30(4): 353 – 362
- 王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004. 鄂东南铜山山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (折沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因. *岩石学报*, 20(2): 351 – 360
- 汪洋, 邓晋福, 姬广义. 2004. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义. *岩石学报*, 20(2): 297 – 314
- 王跃, 朱祥坤. 2010. 铜同位素在矿床学中的应用: 认识与进展. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(4): 739 – 751
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 唐群力. 2002. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述. *地质地球化学*, 30(3): 73 – 81
- 肖志明. 1991. 宁镇地区中生代构造分期及其对成岩成矿的控制. *江苏地质*, (1): 12 – 17
- 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
- 曾键年, 李锦伟, 陈津华, 陆建培. 2013. 宁镇地区安基山侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球科学*, 38(1): 57 – 67
- 张旗, 赵太平, 王焰, 王元龙. 2001. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 273 – 280
- 张旗, 王焰, 刘伟, 王元龙. 2002. 埃达克岩的特征及其意义. *地质通报*, 21(7): 431 – 435
- 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