郯庐中南段晚中生代富钾岩浆作用及其对金（铜）成矿的制约*

Late Mesozoic Potash-Rich Magmatism Along Middle-South Parts of Tancheng-Lujiang Deep Fault Zone, and Its Constrains on Gold (Copper) Mineralization

邱检生[1] 罗清华[2] Brent McInnes[3]

（1 南京大学地球科学系，江苏 南京 210093；2 台湾大学地质系， 台北 106-17；3 CSIRO Division of Exploration and Mining, PO Box 136, North Ryde, NSW 2113, Australia）

Qiu Jiansheng[1], Lo Ching-hua[2], Brent McInnes[3]

(1 Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 2 Department of Geology, National Taiwan University, Taibei 106-17, China; 3 CSIRO Division of Exploration and Mining, PO Box 136, North Ryde, NSW 2113, Australia)

摘 要 郯庐中南段及其邻近地区晚中生代富钾岩浆作用强烈，并发育一系列与之有关的金（铜）矿床。系统的 ^{40}Ar-^{39}Ar 定年结果表明，区内富钾火山岩主要形成于早白垩世。这套岩石的主体可归为钾玄岩系，地球化学上，具有富碱、富钾、贫钛，氧化系数较高，富轻稀土和大离子亲石元素，贫高场强元素等特点，并具有较高的 I_{Sr} 值和明显偏低的$\varepsilon_{Nd}(t)$值。元素-同位素的综合示踪显示这套岩石主要起源于富集型地幔的部分熔融。区内与富钾岩浆作用有关的金（铜）矿床可归为岩浆热液型和浅成低温热液型 2 大类，后者又可进一步区分为碲-金型、石英-冰长石型和石英-锰菱铁矿型 3 种型式。根据对富钾岩浆与金（铜）成矿关系研究资料的系统总结，表明富钾岩浆体系富挥发组分（如 H_2O、CO_2、SO_2，特别是 F 和 Cl）及氧逸度较高可能是制约金（铜）成矿的 2 个主要有利因素。

关键词 富钾岩浆作用 金（铜）矿床 晚中生代 郯庐中南段

富钾岩浆岩是一类具有特殊成因指示意义的火成岩组合，这类岩石的研究对于恢复古构造环境，了解地幔的组成与演化及地幔化学和物理性质上的不均一性等均具重要意义。另一方面，这套火成岩组合还与许多重要的浅成低温热液金矿床及斑岩型铜(金)矿床具密切的成因联系，上世纪 80 年代以来，世界上发现的众多超大型、大型金或金-铜矿床均与富钾岩浆岩有关，如巴布亚新几内亚的 Lihir 和 Porgera 金矿床、斐济的 Emperor 金矿床、美国科罗拉多洲的 Cripple Creek 金矿床，以及澳大利亚新南威尔士洲的 Goonumbla 和印度尼西亚的 Grasberg 斑岩型铜（金）矿床等，因此，富钾岩浆作用及其对金-铜成矿的制约日益引起众多学者的广泛关注，成为当前构造-岩浆-成矿作用研究的热门课题。

郯庐断裂中南段及其邻近地区晚中生代富钾岩浆活动强烈，与此相应在区内形成了一系列与之有关的金（铜）矿床，如山东平邑归来庄大型金矿床、山东五莲七宝山金（铜）矿床、大别山北麓磨子潭—晓天火山盆地中的东溪金矿床，以及下扬子断陷带庐枞盆地中的天头山金（铜）矿床和宁芜盆地中的铜井金（铜）矿床等，因此，这一地区构成了一个研究富钾岩浆作用及其对金-铜成矿制约的理想窗口。本文在对区内富钾火山岩年代学及地球化学特征总结的基础上，着重讨论了富钾岩浆作用对金（铜）成矿的制约关系。

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号：49872028)资助
第一作者简介 邱检生，男，1965 年生，博士，副教授，从事花岗岩、火山岩及其与成矿关系研究。

1 富钾火山岩的年代学

郯庐中南段及其邻近地区晚中生代富钾火山岩主要分布在大别－苏鲁聚合带的南北两侧，并较为明显地受到郯庐断裂、长江断裂及其它基底断裂的控制，代表性产区包括山东沂沭断裂带及其两侧地区，下扬子断陷带的庐枞、宁芜和溧水盆地，以及大别山北麓的若干火山岩分布区。前人对区内这套火山岩的形成年龄已进行过较多测定，但早期的年龄多为 K-Ar 年龄(胡华光等，1984)。由于 K-Ar 体系的抗扰动性差，使得 K-Ar 年龄常偏离地质体的实际年龄，加之精度较低，因而定年结果存在某些不确定性。近年来虽有较高精度的年龄（如锆石 U-Pb 年龄和 Rb-Sr 等时年龄等）发表（杨祝良等，1999），但资料尚不是很系统，为此，我们利用高精度的 ^{40}Ar-^{39}Ar 定年方法，对区内富钾火山岩的形成年龄进行了系统测定，表 1 列出了 15 件样品的 ^{40}Ar-^{39}Ar 定年结果。

表 **1** 郯庐中南段及邻区富钾火山岩 ^{40}Ar-^{39}Ar 定年结果

样 号	岩 性	产 地	层 位	^{40}Ar-^{39}Ar 定年结果		
				坪年龄/Ma	等时年龄/Ma	总气体年龄/Ma
Lz-7	安粗质火山岩	庐 枞	砖桥组	140.1 ± 0.8	138.4 ± 1.0	173.4 ± 1.0
Lz-11	钾玄质火山岩	庐 枞	双庙组	125.5 ± 0.8	126.2 ± 0.8	125.7 ± 0.7
Lz-10(A)	辉石二长斑岩	庐 枞	相当于双庙组	123.1 ± 0.7	121.7 ± 2.0	121.3 ± 0.7
Lz-21	粗面斑岩	庐 枞	浮山组	126.0 ± 3.4	124.9 ± 3.6	126.0 ± 3.4
DB-5	安粗质火山岩	大别山北麓	毛坦厂组	127.1 ± 3.5	124.9 ± 3.5	127.1 ± 3.5
DB-11	粗面质凝灰熔岩	大别山北麓	响洪甸组	94.0 ± 2.6	94.0 ± 2.8	96.3 ± 2.6
DB-17	假白榴石响岩	大别山北麓	响洪甸组	101.3 ± 2.8	99.8 ± 3.2	99.6 ± 2.7
DB-24	粗面质响岩	大别山北麓	响洪甸组	103.7 ± 2.8	103.4 ± 3.0	103.7 ± 2.8
F-10	安粗岩	胶 莱	青山组	109.9 ± 0.6	110.1 ± 1.7	109.0 ± 0.6
F-12	粗面岩	胶 莱	青山组	108.2 ± 0.6	107.5 ± 0.9	103.4 ± 0.6
My-1	钾玄岩	蒙 阴	青山组	114.8 ± 0.6	115.2 ± 0.6	117.4 ± 0.6
My-2	钾玄岩	蒙 阴	青山组	117.8 ± 0.6	117.9 ± 0.9	116.6 ± 0.6
My-4	安粗岩	蒙 阴	青山组	124.3 ± 0.6	123.5 ± 1.9	123.3 ± 0.7
My-5	钾玄岩	蒙 阴	青山组	117.0 ± 0.6	116.9 ± 1.2	118.6 ± 0.7
My-6	钾玄岩	蒙 阴	青山组	118.2 ± 0.6	117.7 ± 1.0	118.6 ± 0.7

注：数据在台湾大学地质系 Ar-Ar 同位素实验室测定。

由表中数据可看出，所测样品的坪年龄与等时年龄在测试误差范围内基本一致，年龄谱均较平稳（图略），且多数样品的（$^{40}Ar/^{36}Ar$）$_i$ 值与大气氩值（为 295.5）（Faure, 1986）相差不大，说明体系内存在放射成因过剩 ^{40}Ar 的可能性较小，因此，坪年龄可以代表火山岩的形成年龄。这些年龄测定结果表明区内火山岩主要形成于早白垩世（100～137 Ma），在空间上，总体具有自南向北，自西向东，年龄渐新的变异特点。

2 富钾火山岩的地球化学

区内富钾火山岩的主体可归之为钾玄岩系，代表性岩石组合为粗面玄武岩-粗安岩-安粗岩-粗面岩，少部分为高钾钙碱性岩系，包括高钾安山岩、高钾英安岩等。这套岩石均具有富碱（里特曼指数多介于 3.3～9.0）、富钾、贫钛（TiO_2 一般均小于 1.30%）及氧化系数较高的化学组成特征，并富轻稀土和大离子亲石元素（如 Rb、Th、Pb 等），贫高场强元素(如 Nb、Zr 等)。岩石的 La/Nb、Ba/Nb 比值均较高，Nb 负异常显著，且富放射成因锶，并具有显著偏低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值。元素-同位素组成的综合示踪显示岩浆上升过程中所遭受的地壳物质的混染程度不强，富钾火山岩类似壳源岩石的地球化学组成特点主要为岩浆起源于富集型地幔的部分熔融所致。但大别－苏鲁聚合带南北两侧富钾火山岩的 Nd-Sr-Pb 同位素组成有较明显的区别，聚合带北侧富钾火山岩具有更高的 I_{Sr} 值、更低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值和较低的 Pb 同位素组成，其岩浆源区的富集程度较之聚合带南侧富钾火山岩更高。通过 Nd、Sr 同位素组成的混合模拟和岩浆源区性质的反演，结合 2 区岩石产出动力地质背景的综合分析，表明 2 区火山岩的形成均受到了古太平洋板块对欧亚板块碰撞俯冲

动力因素的影响，岩浆源区均遭受了俯冲洋壳析出流体的交代作用，但大别－苏鲁聚合带北侧富钾火山岩的岩浆源区还受到了俯冲的扬子陆壳析出流体的交代作用，即其源区遭受了 2 次富集事件的影响，因而造成了其源区富集程度较之聚合带南侧富钾火山岩更高的地球化学特点。

3　与富钾岩浆作用有关金（铜）矿床的主要特征

区内与富钾岩浆作用有关的金(铜)矿床均和火山机构存在较为密切的空间共生关系，如七宝山金(铜)矿床产于七宝山火山机构中，江苏铜井金（铜）矿床产于娘娘山火山机构中，天头山金（铜）矿床位于黄公山火山机构附近。归来庄金矿尽管在矿田范围内未发现火山岩，但主要矿体均定位于隐爆角砾岩中，表明矿化与火山隐爆作用存在密切的联系。按成矿地质特征及矿床地球化学研究资料（Qiu et al, 1999, 2000），区内与富钾岩浆作用有关的金（铜）矿床可归为 2 大类，即岩浆热液型矿床和浅成低温热液型矿床，其中后者又可进一步区分为碲金型、石英-冰长石型和石英-锰菱铁矿型三种型式。岩浆热液型矿床的典型矿例为山东五莲七宝山金（铜）矿，3 种型式浅成低温热液矿床的典型矿例分别为归来庄金矿、东溪金矿和天头山金（铜）矿。岩浆热液型金（铜）矿床常具有中-高温和高盐度的成矿介质环境，成矿流体富 Cl^-，成矿体系 H-O-C-S 同位素的综合示踪显示成矿物质及成矿热液均主要来自岩浆。3 种型式浅成低温热液金（铜）矿床均具有中－低温、低压的成矿介质环境。归来庄和东溪金矿成矿流体的含盐度较低（w（$NaCl_{eq}$）分别为 1.28%～5.31%和 2.01%～8.67%），但天头山金（铜）矿床成矿流体具有相对高且变化范围大的含盐度（w（$NaCl_{eq}$）为 7.0%～19.0%），与岩浆热液型金（铜）矿床相似，这种特征被认为是该区基底地层中的膏盐层（三叠系周冲村组）参与成矿过程所致（任启江等，1991）。稳定同位素研究结果表明，天水的对流循环对围岩中成矿物质的萃取在浅成低温热液型金(铜)矿床的成矿过程中起着至关重要的作用。对天头山金(铜)矿床而言，成矿热液除以天水为主外，还有少量建造水和岩浆水的混入(任启江等，1991)。

4　富钾岩浆作用对金（铜）成矿制约关系讨论

Muller 等（1997）对富钾岩浆与金（铜）成矿之间的直接和间接关系进行了详细讨论，但富钾岩浆作用对金（铜）成矿制约的内在机理尚不十分清楚。Rock 等（1988）认为对地幔起交代作用的富挥发组份和大离子亲石元素的流体有利于从地幔中带出金等成矿元素。McInnes（1997）认为硫是控制岩浆体系中金、铜含量的关键元素。实验资料表明，在相似的温度和氧逸度条件下，高钾钙碱质和钾玄质等富钾岩浆熔体中 SO_4^{2-}的浓度是正常钙碱质岩浆熔体的 2～3 倍（Ducea et al., 1994）。由于富钾岩浆常形成于较高的氧逸度介质环境，这种环境促使岩浆体系中的硫主要呈 SO_4^{2-}状态存在，不至于使体系中的 S^{2-}达到饱和而引起金、铜等成矿元素的沉淀，因而有助于金、铜等成矿元素运移至地壳浅部。区内与富钾岩浆作用有关金（铜）矿床的成矿岩体均具有较高的 $Fe_2O_3/$（Fe_2O_3＋FeO）比值，如七宝山和归来庄矿床成矿岩体的 $Fe_2O_3/$（Fe_2O_3＋FeO）比值多在 0.50 以上，含金斑岩铜矿成矿岩体磁铁矿含量较高也说明它们形成的氧逸度较高，因此，富钾岩浆体系较高的氧逸度状态是制约金（铜）成矿的有利条件之一。

另外，富钾岩浆还富含卤族元素，Kesler 等（1975）的统计数据表明，钾质侵入体（K_2O ＞2%）全岩的平均卤族元素含量（F 为 620 $\times10^{-6}$, Cl 为 240 $\times10^{-6}$）较之贫钾侵入体（K_2O＜2%）明显偏高(F 为 380 $\times10^{-6}$, Cl 为 160 $\times10^{-6}$)。我们对郯庐南段庐枞和大别山北麓晚中生代富钾火山岩代表性岩石样品的 F 含量进行了系统测定，结果显示，绝大多数样品的氟含量均在 500 $\times10^{-6}$以上，个别样品的氟含量高达 2500 $\times10^{-6}$, 足见区内富钾火山岩具明显的富氟特征。归来庄金矿成矿岩体的平均 F 和 Cl 含量（分别为 787$\times10^{-6}$和 344 $\times10^{-6}$）也显著偏高，且岩石的 F 含量与 K_2O 含量存在显著的正相关。Loferski 等（1995）的研究表明，F 和 Cl 作为成矿元素运移的介质在热液成矿体系中起着至关重要的作用，在岩浆去气过程中，铜和金易于呈氯的络合物形式优先进入气相(Hayashi et al.,1991)，随着岩浆冷却作用的进行及体系还原性增强，体系中的 SO_2 将向 S^{2-}转变，进而导致含铜硫化物的沉淀(Richards, 1995)。尽管金也可以和这些含铜

硫化物一起沉淀，但大部分金将留在热液中，至较低的温度条件下转化为二硫化物(Hayashi et al., 1991)，并在较浅的部位沉淀。这些研究结果与区内七宝山金（铜）矿床所见的上金下铜的矿化分带一致。因此，富钾岩浆富挥发组分（如 H_2O、CO_2、SO_2，特别是 F 和 Cl）及氧逸度较高可能是制约金（铜）成矿的 2 个主要有利因素。

参 考 文 献

胡华光，胡世玲，王松山，等. 1984. 华东及邻区中、新生代火山岩同位素地质年龄. 见：吴利仁主编. 华东及邻区中、新生代火山岩. 北京：科学出版社. 56～82.

任启江，刘孝善，徐兆文，等. 1991. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用. 北京：地质出版社. 206.

杨祝良，沈加林，沈渭洲，等. 1999. 北淮阳中生代火山-侵入岩同位素年代学研究. 地质论评, 45（增刊）：674～680.

Ducea M N, McInnes B I A, Wyllie P J. 1994. Sulfur variations in glasses from volcanic rocks: effect of melt composition on sulfur solubility. International Geology Review, 36：703～714.

Faure G. 1986. Principles of isotope geology (2nd edition). Wiley & Sons, New York, 589p.

Hayashi K, Ohomoto H. 1991. Solubility of gold in NaCl- and H_2S-bearing aqueous solutions at 250~350°C. Geochim et Cosmochim Acta, 55：2111～2126.

Kesler S E, Issigonis M J, Brownlow A H, et al. 1975. Geochemistry of biotites from mineralized and barren intrusive systems. Econ Geol, 70：559～567.

Loferski P J, Ayuso R A. 1995. Petrography and mineral chemistry of the composite Deboullite pluton, northern Maine, USA: implications for the genesis of Cu-Mo mineralization. Chem Geol, 123：89～105.

McInnes B I A. 1997. The role of arc magma alkalinity in Cu-Au metallogenesis. Geol Soc Australia Abstr, 44：49.

Muller D, Groves D I. 1997. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization (2nd edition). Springer, 238p.

Qiu J S, Lo C-H, McInnes B I A, et al. 2000. Potash-rich magmatism and associated gold-copper mineralization in the Yishu deep fault zone and its vicinity, eastern China. Resource Geology, 50(4)：269～280.

Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Brent I A McInnes, et al.1999. Metallogeny of shoshonite-hosted copper-gold deposits in the middle-south parts of Tancheng-Lujiang deep fault zone and its vicinity, eastern China. Journal of China University of Geosciences, 10（2）：47～50.

Richards J P. 1995. Alkalic-type epithermal gold deposits —— a review. In: Thompson J F H (ed.). Magmas, Fluids, and Ore Deposits. Mineral Assoc Canada, Short Course Ser, 23：367～400.

Rock N M S, Hallberg J A, Groves D I, et al. 1988. Archean lamprophyres in the gold-fields of the Yilgan Block, western Australia: new indicators of the widespread distribution and significance. In：Ho S E and Groves D I (eds.). Advances in Understanding Precambrian Gold Deposits (Volume 2). Perth, University of Western Australia Press, 245～275.