

长江中下游两个系列铜、金矿床及其成矿流体系统的氢、氧、硫、铅同位素研究*

周涛发 岳书仓 袁 峰 刘晓东 赵 勇

(合肥工业大学资源与环境科学系, 合肥 230009)

摘要 基于长江中下游成矿带铜、金矿床地质特征和氢、氧、硫、铅同位素研究, 认为两个系列铜、金矿床是不同动力学背景、不同时代的两个成矿流体系统演化的产物: 层状矿床组成的系列 I 铜、金矿床形成于海西期拉张构造背景下, 由热卤水沿同生断裂上升, 经海底喷流(气)和热水沉积作用形成; 与中酸性岩浆侵入活动有关的系列 II 铜、金矿床形成于燕山期特提斯构造域和古太平洋构造域复合及与之相关联的地幔隆起和地壳减薄等深部过程耦合作用背景下的造山作用挤压-伸展转变期, 是岩浆热液与部分大气降水混合形成的热液流体经复杂的水-岩作用和输运-化学耦合过程形成的。叠加作用是区内大型矿床的重要形成条件。

关键词 成矿流体系统 同位素 铜、金矿床 长江中下游

长江中下游地区分布有一条具鲜明地质特色的铜(铁)、金(多金属)大型成矿带, 也是我国主要的金属成矿带之一。长期以来, 鉴于该成矿带形成的复杂地球动力学背景和成矿地质地球化学特征, 对铜、金矿床的系列划分、成矿物质和成矿流体的来源及成矿机理的认识不一。本文在前人及前期研究成果的基础上, 分析和对比了长江中下游成矿带铜、金矿床地质特征和同位素地球化学特征, 探讨该成矿带铜、金矿床的成矿系列、成矿流体系统性质与演化以及矿床形成机理。

1 成矿带铜、金矿床的基本地质特征与成矿系列

长江中下游成矿带有铜、金矿床 70 余处, 主要集中分布于鄂东南、封瑞九、贵池-安庆、庐枞、铜陵等矿床密集区^[1~3]。对比分析矿床地质特征(图 1), 成矿带铜、金矿床可划分为两大类:

第 1 类铜、金矿床的产出受特定的岩性、岩相和古地理环境控制(图 1)。矿体多呈层状、似层状, 赋存于上石炭统黄龙组下部碎屑岩相与碳酸盐相过渡部位。含矿岩系主要为细碎屑岩(粉砂岩或砂页岩)-含铜黄铁矿层-白云岩-灰岩组合, 部分地区含矿岩系中具沉积硬石膏层和石膏假晶, 赋矿层位处于海侵岩系底部, 赋矿地层中相继发现层状火山碎屑岩和熔岩^[4]。层状矿体与围岩产状近一致, 矿体沿走向延长较大, 常在 1 000 m 以上, 矿体与围岩具同步褶皱, 典型矿床如城门山 IV 矿带、武山北矿带、松树山、冬瓜山、新桥、马山等矿床。层状矿体具相似的矿物组成, 金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿, 次为胶黄铁矿、菱铁矿、方铅矿、闪锌

2000-03-24 收稿, 2000-08-24 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49802007)

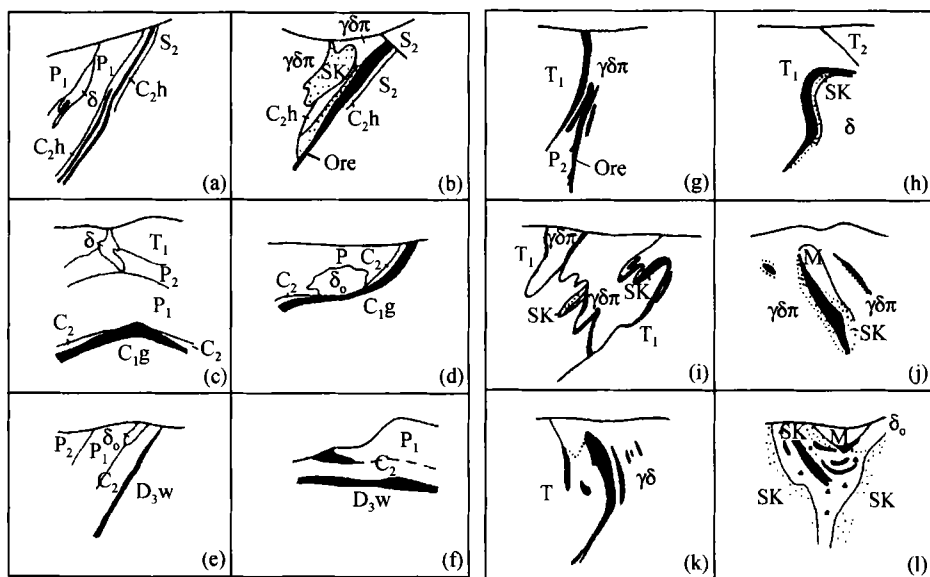


图1 长江中下游铜、金矿床剖面示意图

系列 I: (a) 武山(北), (b) 城门山, (c) 冬瓜山, (d) 新桥, (e) 铜官山(石炭系中矿体), (f) 天鹅抱蛋山
系列 II: (g) 武山(南), (h) 安庆, (i) 鸡笼山, (j) 铜绿山, (k) 凤凰山, (l) 狮子山。S₂ 示中志留统, D_{3w} 示上泥盆统五通组, C_{1g} 示下石炭统高骊山组, C₂ 示上石炭统, C_{2h} 示上石炭统黄龙组, P₁ 示下二叠统, P₂ 示上二叠统, T₁ 示下三叠统, T₂ 示中三叠统, T₃ 示上三叠统, γδπ 示花岗闪长斑岩, δ 示闪长(斑)岩, γδ 示花岗闪长岩, δo 示石英闪长岩, M 示大理岩, SK 示砂卡岩; Ore 示矿体

矿和白铁矿等, 脉石矿物以石英、方解石、白云石为主。矿石构造为层纹状、胶状、角砾状、包卷状和块状等, 球粒状、草莓状、碎屑状和自形-他形粒状结构。矿床围岩蚀变简单, 强度不大, 主要为硅化、绢云母化和黄铁矿化等。矿床多数经历了燕山期岩浆活动的叠加与改造, 出现部分砂卡岩矿物组合。

第2类铜、金矿床与燕山期中酸性岩浆侵入岩有关, 包括4个主要成因类型, 即接触交代型、斑岩型、隐爆角砾岩型和热液脉型, 以接触交代型为主, 其次为斑岩型, 典型矿床如铜官山、铜绿山、凤凰山、安庆铜矿、武山南矿带、城门山 I 和 II 矿带、铜山、封三洞、沙溪及铜牛井等矿床。矿体的形态复杂, 呈透镜状、扁豆状、囊状、似层状和团块状等, 矿体数量较多, 规模大小不一(图1), 多产于岩体与围岩的接触带或岩体内部。与矿床有关的侵入岩主要是燕山期花岗闪长斑岩、石英闪长岩等。矿床具典型的砂卡岩型、斑岩型和热液型矿石结构构造以及矿物组合, 金属矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿, 次为磁铁矿、赤铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿和自然金等。矿床围岩蚀变强烈, 如钾长石化、钠长石化、阳起石-透闪石化、绿泥石化、硅化、黄铁矿化和碳酸岩化等, 常呈带状分布。

依据成矿年代学研究^[1~7], 长江中下游地区武山、新桥等层状矿床的矿石铅模式年龄与赋矿围岩石炭纪黄龙组地层时代一致。武山和新桥层状矿体的 Rb-Sr 等时线年龄分别为(328±21) Ma 和(313±32) Ma^[1], 石炭系地层中火山岩的时代为(345±37) Ma^[4], 因此, 此类矿床的成矿流体系统形成于海西期, 与海西期海底沉积与火山活动有关。区内与中酸性侵入岩有关的铜、金矿床皆形成于燕山期^[1,5], 成矿时代与燕山期侵入岩的形成时代相近, 侵入岩的成岩年龄范围为 117~149 Ma, 矿床的成矿同位素年龄范围为 115~142 Ma^[1,5~7]。同一矿床密集区内的岩体

与矿床的形成年龄几乎相同,如安庆月山矿田石英二长闪长岩的成岩时代为 138 Ma,矿床同位素年龄为 131 Ma;铜绿山矿区石英二长闪长岩的时代为 134 Ma,矿床同位素年龄为 115~131 Ma;铁山矿区二长闪长岩的时代为 134 Ma,矿床同位素年龄为 132 Ma 等。因此,此类铜、金矿床的成矿流体系统形成于燕山期,与燕山期岩浆活动密切相关。

前人^[2,3,7~9]曾从不同角度划分了长江中下游地区矿床的成矿系列。基于此,本文进一步根据矿床地质特征、矿床组合和成矿时代,将长江中下游成矿带的铜、金矿床划分为两个成矿系列:与海西期海底喷流(火山)-沉积作用有关的成矿系列(以下简称系列 I)和与燕山期中酸性侵入岩有关的成矿系列(以下简称系列 II)。两个系列铜、金矿床在空间上的叠加,形成复合型复成因铜、金矿床,如城门山矿区的层状含铜黄铁矿矿床、接触交代型和斑岩型铜、金(钼)矿床的“三位一体”组合等。这种系列划分方案避免了仅强调岩浆活动或仅强调沉积作用与铜、金成矿作用的关系划分成矿系列,真实地反映了不同地质背景、不同时代条件下两大性质不同的成矿流体系统的演化过程及其产物的特点。

2 铜、金矿床成矿流体系统的氢、氧、硫、铅同位素地球化学制约

2.1 氢-氧同位素

长江中下游地区系列 I 矿床成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 在 $-16.20\text{‰} \sim 1.30\text{‰}$ (SMOW) 之间, $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 在 $-51.6\text{‰} \sim 133.9\text{‰}$ 之间(表 1), 其 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值明显低于初生岩浆水^[10], 但与现代地表

表 1 长江中下游地区部分铜、金矿床的氢、氧同位素组成范围

矿床(系列)	样品	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} \text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} \text{‰}$	资料来源
系列 I				
武山	石英	-4.75	-51.6	a)
	石英	-1.41	-83.4	a)
	石英	-7.31~-4.03	-51.6~-85.4	[9]
	黄铁矿	-5.30	-107.2	[9]
	闪锌矿	-7.80	-92.1	[1]
城门山	石英	-8.70	-69.0	[1]
冬瓜山	黄铁矿	0.20	-94.3	[1]
	磁黄铁矿	1.30	-133.9	[1]
新桥	闪锌矿	-16.20	-119.9	b)
	石英	-0.54	-81.24	[1]
系列 II				
铜官山	上部石英	10.66	-87.7	[7]
	下部石英	6.90	-62.0	[7]
安庆铜矿	矽卡岩阶段石榴石	7.44~9.98	-68.0	
	磁铁矿阶段磁铁矿	8.04~12.40	-72.0	
	石英硫化物阶段石英	4.01	-78.0	
	石英碳酸盐阶段			
	石英、方解石	3.14~3.74	-65.0	
铜牛井	石英	3.47~6.76	-74.0	
长龙山	石榴子石	4.24	-71.32	[1]
	方解石	5.31	-51.17	[1]
铜绿山	石英	7.10	-73.0	[7]
铜山口	石英	6.17	-57.1	[7]
	石英	6.90	-74.0	[3]
	石英	3.49	-65.4	[3]

a) 赣西北地质队(1988); b) 安徽 321 地质队(1985); 其余为本文测试, 测试者: 中国地质科学院万德芳等

水的氢氧同位素组成相近(武山、城门山矿床地表水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -4.9‰ ~ -5.2‰ , $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -29.5‰ ~ -31.6‰ ; 冬瓜山矿床地表水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -5.3‰ ~ -7.2‰ , $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -34.6‰ ~ -47.1‰ ^[1]). 在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ - $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ 组成图上(图 2), 各矿床成矿流体的氢、氧同位素组成位于大气降水线附近或界于大气降水线与岩浆水区域之间, 表明成矿流体主要是海水和大气降水深循环形成的热卤水或封存的热卤水, 可能有部分岩浆水的混入. 流体包裹体研究显示, 该系列矿床的成矿流体是一种低温(100°C 左右)、酸性、富含金属元素的还原性流体; Cl 和 H_2S 含量及 $\text{H}_2\text{S}/\text{SO}_4^{2-}$ 比值明显高于正常海水, 盐度大于海水, 在 4% ~ 20% 之间^[1,5,11]. 因此, 成矿流体主要为热卤水.

与燕山期侵入岩有关的系列 II 铜、金矿床成矿流体的氢氧同位素(表 1, 图 2)组成落入岩浆水区域及其附近, 肯定了岩浆水在此类矿床形成过程中的主导作用. 此类矿床成矿流体的温度高, 如矽卡岩型矿床矽卡岩阶段形成于 $475^\circ\sim 680^\circ\text{C}$ 之间, 铁、铜(金)主要矿化阶段的形成温度分别为 $400^\circ\sim 600^\circ\text{C}$ 和 $220^\circ\sim 400^\circ\text{C}$ ^[10]. 流体包裹体子晶发育, 盐度高, 达 $29\sim 45\%$ (质量百分比), 成矿溶液的 $\text{Cl}^- > \text{F}^-$ 、 $\text{Na}^+ > \text{K}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ ^[5,11,12]. 以安庆铜矿床为例(表 1), 矽卡岩阶段成矿热液为岩浆水, 磁铁矿阶段为岩浆水与地层发生水岩交换作用后的“漂移”岩浆水^[12], 石英硫化物阶段及石英碳酸岩阶段为岩浆水和大气降水的混合. 铜牛井^[5,12]、铜陵^[13]、沙溪^[14]等矿床的成矿流体亦具类似演化规律. 所以, 此类铜、金矿床的成矿物质是从岩浆水和/或具复杂演化历史的岩浆水与大气降水混合的热液中沉淀的.

2.2 硫同位素

图 3 为长江中下游地区两个系列铜、金矿床的硫同位素组成范围, 硫同位素资料主要据参考文献[1~4, 12~14]. 系列 I 矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 总体变化范围不大, 在 -1.3‰ ~ $+5.5\text{‰}$ 之间, 本区石炭纪黄龙组中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 出现较大负值, 为 -17.4‰ ~ -44.7‰ , 沉积硬石膏的硫同位素值在 14.5‰ ~ 20.3‰ 之间, 平均值为 16.69‰ . 系列 I 矿床的硫同位素组成符合显生宙块状硫化物矿床的硫同位素组成与同时代海水硫酸盐的硫同位素分馏关系(差值为 13.9‰ ^[15]), 本区石炭纪沉积硬石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值(16.69‰)与石炭纪海水硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ (15‰ ^[16])相近, 各矿床黄铁矿与硬石膏的硫同位素分馏系数也位于 Ohmoto 和 Rye 关于黄铁矿与物源区的 $\delta^{34}\text{S}$ 差值为 15‰ 的范围^[16]内. 因此, 结合矿床地质特征和氢氧同位素地球化学特征, 认为系列 I 矿床的硫主要来自海水硫酸盐的还原, 成矿流体系统类似于海底喷流(气)-热水沉积矿床^[15]的成矿热液系统.

系列 II 铜、金矿床硫同位素值变化范围大小不一(图 3), 多数是在零值附近和偏离零的正值, 如与燕山期侵入岩时空关系密切的铜绿山、凤凰山等矿床; 部分矿床如安庆铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值既有正值, 也有较大负值. 可见, 系列 II 矿床硫的来源复杂. 本区各种可能硫源的硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}$ 值)分别为: 岩浆(岩) 0.09‰ ~ 7.87‰ , 平均值为 3.50‰ ; 沉积碎屑岩 -16.7‰ ~ -31.1‰ , 平均值为 -24.0‰ ; 三叠系含膏盐地层 25.3‰ ~ 34.4‰ , 平均值为 30‰ ^[12]. 成矿热液的硫同位素组成

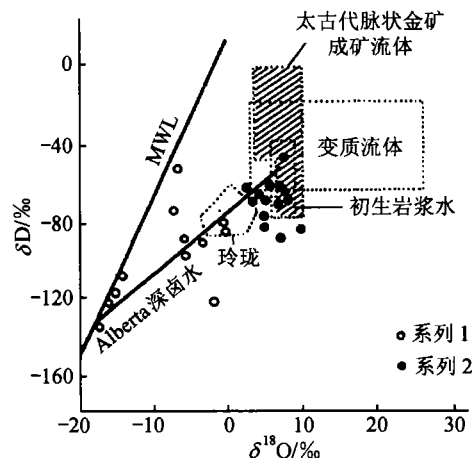


图 2 长江中下游铜、金矿床系列成矿流体的氢、氧同位素组成

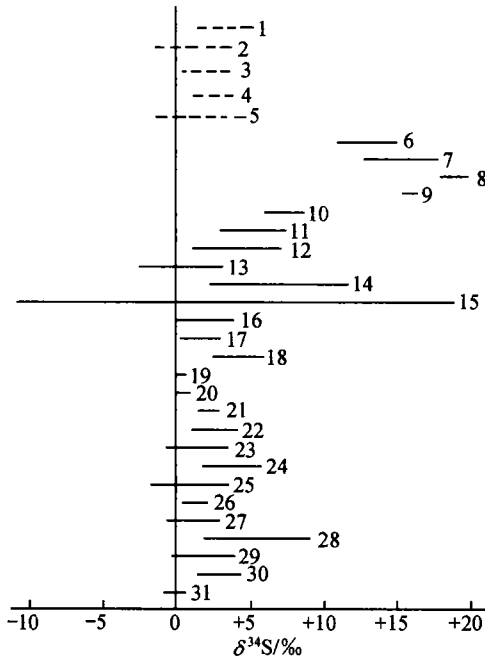


图 3 长江中下游地区主要铜、金矿床的硫同位素组成范围

硫同位素资料主要参考文献[1~4, 12~14]和本次研究系列 I: 1. 冬瓜山, 2. 新桥, 3. 洋鸡山, 4. 城门山, 5. 武山(北)

系列 II: 6. 程潮, 7. 刘家畈, 8. 广山, 9. 余华寺, 10. 小红山, 11. 铁山, 12. 铜山, 13. 安基山, 14. 龙门山, 15. 安庆, 16. 折腰山, 17. 狮子山, 18. 凤凰山, 19. 沙滩角, 20. 金口岭, 21. 铜官山, 22. 城门山, 23. 武山(南), 24. 鸡笼山, 25. 封三洞, 26. 冯家山, 27. 沙溪, 28. 铜鼓山, 29. 龙角山, 30. 铜绿山, 31. 铜山口

与硫源的硫同位素组成、水岩比值及温度有关(图 4)^[12], 当以岩浆热液($\delta^{34}\text{S} = 3.5\text{‰}$)为主的热液流体与含膏盐碳酸盐地层在 $250^\circ \sim 600^\circ\text{C}$ 温度内发生硫同位素交换作用, 形成的成矿热液的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 为 $3.0\text{‰} \sim 17.0\text{‰}$; 当岩浆热液与碎屑岩地层在 $250^\circ \sim 600^\circ\text{C}$ 温度内发生硫同位素交换作用, 形成的成矿热液的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 为 $-25.5\text{‰} \sim 3.5\text{‰}$ (图 4). 对比系列 II 铜、金矿床硫同位素组成(图 3)可知, 此类矿床成矿流体系统中的硫主要由岩浆热液提供, 此外, 通过岩浆热液与含膏盐碳酸盐地层或/和碎屑岩地层在一定的物理化学条件下和水岩比范围内发生水岩作用, 亦为矿床提供了部分地层硫, 且多数矿床中的地层硫主要由三叠系含膏盐碳酸盐地层提供.

2.3 铅同位素

长江中下游成矿带两个系列铜、金矿床及侵入岩和地层的铅同位素组成如图 5 所示. 其主要特征如下: (i) 受基底和岩浆演化过程制约, 矿石铅同位素具明显的分区性. 以来安-湖州深断裂为界, 其东区(宁芜以东的宁镇、苏锡地区)矿石铅的同位素组成明显低于西区(宁芜及以西至鄂东南)的矿石铅同位素组成. (ii) 层状铜、金矿床(系列 I)的铅同位素组成变化范围小, 基本上属正常铅, 而系列 II 铜、金矿床的

铅同位素组成变化范围大, 且不同成因类型矿床间的同位素组成亦存在差别. (iii) 系列 I 矿

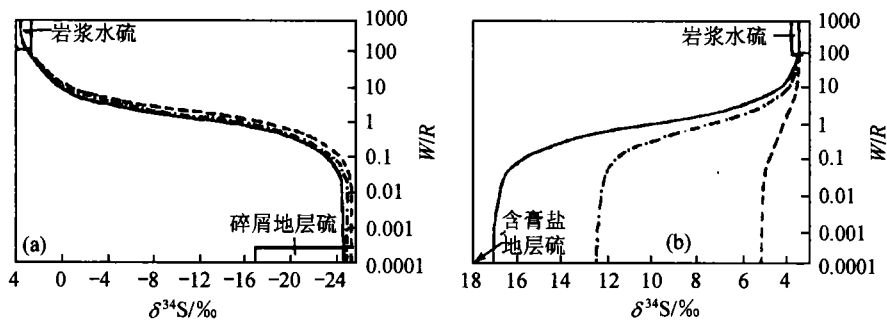


图 4 岩浆热液与碎屑岩地层(a)和含膏盐碳酸盐地层(b)发生水岩作用后成矿流体的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 组成

实线、虚线、点线分别代表 600°C , 400°C 和 250°C 岩浆水的 $\delta^{34}\text{S} = 3.5\text{‰}$; 碎屑岩地层的 $\delta^{34}\text{S} = -24\text{‰}$; 含膏盐碳酸盐地层的 $\delta^{34}\text{S} = 30\text{‰}$.

床的铅同位素组成与石炭系地层的铅同位素组成($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值分别为 18.274, 15.606 和 38.282)相似, 在铅同位素构造模式图上^[17]分布于上地壳与上地幔演化线之间, 落入造山带演化线附近, 但偏离侵入岩体的长石铅同位素组成, 说明本系列矿床成矿流体系统中的金属组分主要来自地层; 锶同位素特征可进一步说明这一认识, 武山、新桥等层状铜、金矿床矿石矿物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值在 0.710~0.714 之间^[1], 明显高于矿区侵入岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(0.706~0.707)^[5], 而与赋矿围岩黄龙组碳酸盐岩(0.710~0.716)^[1]一致, 反映系列 I 矿床的成矿物质主要来自壳源沉积物. 系列 II 铜、金矿床的铅同位素组成与岩体的长石铅($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值分别为 17.813, 15.520 和 38.067)相似, 位于造山带与地幔铅同位素演化线之间, 部分矿床变化范围较大, 落入上地壳与造山带演化线之间, 所以, 此类矿床铅为壳幔混合铅, 其中以幔源铅为主, 成矿流体系统中的铅除主要来自岩浆铅以外, 尚有部分三叠系和前三叠系地层铅.

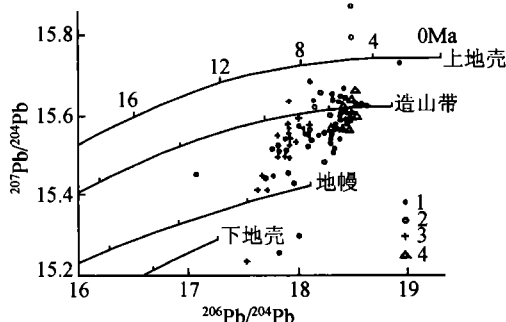


图 5 长江中下游成矿带铜、金矿床及侵入岩和地层的铅同位素组成

1. 系列 I 矿石, 2. 系列 II 矿石, 3. 侵入岩长石, 4. 石炭系地层.
铅同位素资料据文献[1~3, 12~14]和本次研究

3 流体系统演化与成矿讨论

本文基于上述铜、金矿床氢、氧、硫、铅同位素地球化学特征及矿床地质特征和成矿时代研究表明, 长江中下游地区两个系列铜、金矿床的形成与矿床成矿流体系统的性质与演化过程密切相关. 两个系列铜、金矿床是不同时代和地球动力学背景下两种不同来源、且具不同性质和动力学演化过程的成矿流体系统演化的结果.

长江中下游地区经历了多旋回的地质发展过程^[12], 其中, 海西构造旋回的石炭纪主要表现为海侵, 多处发育火山碎屑岩和熔岩, 区域为一拉张断陷盆地, 受同生断裂^[18]或初生裂谷^[4]控制. 系列 I 铜、金矿床的成矿背景为一拉张-裂解的构造环境. 在古海盆基础上形成若干个次一级规模不大的水下隆起和拗陷盆地, 沉积形成晚石炭世的滨海-浅海碳酸盐岩建造, 并伴有海相火山活动. 向下渗流的海水和大气降水在地热及火山热能驱动下, 形成水热循环系统, 萃取地层中的成矿元素, 形成的含矿热卤水沿基底断裂(同生断裂)上升, 产生喷流(气)作用, 成矿流体系统中的金属络合物分解, 并与海水硫酸盐还原形成的硫结合, 形成金属硫化物沉淀, 堆积形成层状铜、金(黄铁矿型等)矿床.

燕山期, 该区受特提斯构造域和古太平洋构造域两种动力学体制的复合及与之相关联的地幔隆起和岩石圈减薄^[19]等深部作用过程控制, 构造环境由大陆边缘向陆内断块环境过渡. 本文认为系列 II 铜、金矿床成矿流体系统的形成、演化及成矿作用发生于张性或向张性过渡的地球动力学背景之下, 其性质类似于碰撞造山作用的挤压-伸展转变期^[20,21]. 中酸性岩浆演化过程中形成的岩浆热液与深循环的大气降水混合形成的热液流体, 与围岩发生强烈的水岩作用, 汲取部分地层中硫、铅等成矿物质, 在有利的围岩和构造条件下, 经过复杂的运输-反应耦合动力学过程^[13], 形成矽卡岩型、斑岩型和热液脉型等系列 II 铜、金矿床. 若这一过程叠加

于系列 I 铜、金矿床之上, 则形成复合型或复成因铜、金矿床. 叠加作用形成本区的大型和特大型铜、金矿床.

致谢 研究过程中曾先后得到李文达研究员、王文斌研究员、常印佛院士、胡受奚教授、陈江峰教授、顾连兴教授、班宜忠高工、疏志明高工、王文章工程师、万德芳研究员、陈衍景博士、倪培博士等的指导和帮助, 并得到安徽省地矿局 326 地质队、铜陵有色金属工业公司安庆铜矿、安庆市月山铜矿等单位的大力支持. 在此一并致以衷心的感谢.

参 考 文 献

- 1 李文达, 王文斌, 范洪源, 等. 长江中下游铜(金)矿床密集区形成条件和超大型矿床存在的可能性. 火山地质与矿产, 1997, 20(增刊): 1~131
- 2 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游钢铁成矿带. 北京: 地质出版社, 1991. 294~312
- 3 翟裕生, 姚书振, 林新多, 等. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京: 地质出版社, 1992. 1~11
- 4 顾连兴, 徐克勤. 论长江中下游中石炭世海底块状硫化物矿床. 地质学报, 1986, 60(2): 176~187
- 5 Zhou T F, Yue S C. Geochronology and geochemistry of the Cu, Au mineralization belt in the middle and lower reaches of the Yangtze River area, China. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(sup): 164
- 6 周涛发, 岳书仓. 安徽月山地区成岩-成矿作用关系. 火山地质与矿产, 1995, 16(2): 35~66
- 7 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 安徽沿江地区铜金多金属矿床. 北京: 地质出版社, 1998. 210~240
- 8 程裕淇, 陈毓川. 再论矿床的成矿系列问题. 地质论评, 1983, 29(2): 1~12
- 9 季绍新, 王文斌, 邢文臣, 等. 赣西北铜矿床. 北京: 地质出版社, 1990. 121~157
- 10 Taylor H P. Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks. Earth Planet Sci Lett, 1978, 38: 177
- 11 周涛发, 岳书仓, 刘晓东. 长江中下游铜、金矿床密集区形成条件及矿床成因研究综述. 地质科技情报, 1999, 18(3): 51~54
- 12 周涛发, 岳书仓. 月山地区成矿作用同位素地球化学研究. 矿床地质, 1996, 15(4): 341~350
- 13 於崇文, 岑 况, 鲍征宇, 等. 成矿作用动力学. 北京: 地质出版社, 1998. 30~76
- 14 任启江, 刘孝善, 徐兆文. 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, 1991. 79~120
- 15 Sangster D F. Sulfur and lead isotopes studies in strata-bound deposits of calc-alkaline affiliation. Geol Assoc Canada, 1976, Spec Paper 14: 154
- 16 Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. New York: John Wiley & Sons, 1979. 40~66
- 17 Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—The model. Tectonophysics, 1981, 75: 135~142
- 18 翟裕生, 邓 军, 宋鸿林, 等. 同生断裂对层控超大型矿床的控制. 中国科学, D 辑, 1998, 28(3): 214~218
- 19 邓晋福, 莫宜学, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境. 矿床地质, 1999, 18(4): 308~315
- 20 陈衍景, 郭光军, 李 欣. 华北克拉通花岗绿岩地体中生代金矿床的成矿地球动力学背景. 中国科学, D 辑, 1998, 28(1): 35~40
- 21 陈衍景, 陈华勇, 刘玉琳, 等. 碰撞造山过程内生矿床成矿作用的研究历史和进展. 科学通报, 1999, 44(16): 1681~1689