

安徽铜陵新桥铜硫铁矿床地球化学特征及成因分析

张 宇^{1,2}, 邵拥军^{1,2}, 刘忠法^{1,2}, 周 鑫^{1,2}, 郑明泓^{1,2}

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

摘 要: 从矿床地球化学特征入手, 对矿区的矾头复式岩株、1 号矿体矿石、矽卡岩和矿体围岩(黄龙组和船山组的灰岩)的常量元素、稀土元素和微量元素特征进行探讨。结果表明: 矾头复式岩株的闪长岩类岩石属于硅酸弱饱和和类钙碱性准铝质岩石, 其岩浆主要来源于上地幔, 且在岩浆上升过程受到了地壳物质的混染; 岩体中 Cu 元素强烈富集, 岩浆具备提供成矿物质的潜力; 1 号矿体中的矿石稀土配分曲线、 Σ REE 和 6 种常见成矿元素(W、Sn、Cu、Pb、Zn、Ag)含量均与岩体和矽卡岩的相近, 而与黄龙组和船山组灰岩的相差较大。在此基础上, 结合新桥铜硫铁矿床的控矿因素、岩体地球化学特征、矿石结构构造、围岩蚀变、矿石矿物分带特征、矿床地球化学特征、成矿物质来源以及与典型 Sedex 矿床和矽卡岩矿床的对比, 得出岩浆是区内成矿的必要因素, 新桥铜硫铁矿床应以接触交代作用为主的矽卡岩型铜硫铁矿床。

关键词: 新桥; 矿床地质特征; 地球化学特征; 控矿因素; 矿床成因

中图分类号: P591

文献标志码: A

Geochemical characteristics and genesis of Xinqiao Cu-S-Fe deposit, Tongling, Anhui Province, China

ZHANG Yu^{1,2}, SHAO Yong-jun^{1,2}, LIU Zhong-fa^{1,2}, ZHOU Xin^{1,2}, ZHEN Ming-hong^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The geochemical characteristics in macroelements, REE and trace elements of Orebody No.1, skarns and wall rocks (limestones in Huanglong Group and Chuanshan Group) were discussed. The results show that Jitou rock strains are weak silicate saturated, vice-metaluminous and calc-alkaline, originated from upper mantle and contaminated by crustal materials during diagenetic evolution process. The element Cu in Jitou rock Strains is so rich that the magma has the potential to supply metallogenic substances, and the REE distribution curves, Σ REE and contents of six metallogenic elements (W, Sn, Cu, Pb, Zn, Ag) of ore in Orebody No.1 are similar to ones of Jitou rock strains and skarn, but different from ones of limestones in Huanglong Group and Chuanshan Group. On these basis, the genesis of the deposit was studied by analyzing ore-controlling factors, geochemical characteristics of Jitou rock strains, ore structures, alteration of wall rock, mineral zonation, geochemical characteristics of the deposit, source of ore-forming materials and comparison among typical Sedex type deposit, skarn type deposit and Xinqiao Cu-S-Fe deposit. The conclusions are that the magma is the necessary factor of the mineralization, and that Xinqiao Cu-S-Fe deposit is skarn-type Cu-S-Fe deposit because of its contact metasomatism.

Key words: Xinqiao; geological characteristics of deposit; geochemical characteristics; ore-controlling factors ; genesis of deposit

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目 04 课题(200911007-04); 中南大学地球科学与信息物理学院教育部重点实验室“有色金属成矿预测”专项基金; 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2013zzts056)

收稿日期: 2012-08-26; **修订日期:** 2012-11-19

通信作者: 邵拥军, 教授, 博士; 电话: 13973149482; E-mail: shaoyongjun@126.com

新桥铜硫铁矿床是我国长江中下游成矿带铜陵矿集区内一个非常重要的矿床。经过众多地质工作者多年的研究, 该矿床在岩体定年、成矿元素分带、成矿流体、控矿因素、成矿规律及找矿标志等方面均取得了丰硕的成果^[1-11], 但同时由于对成矿时代、成矿物质来源和矿区典型的胶状黄铁矿成因等方面的认识存在不足, 使得其矿床成因一直处于争论之中, 目前新桥铜硫铁矿床的成因认识主要有 3 种观点: 同生沉积—岩浆热液改造成因^[3, 12-14]、海西期海底喷流沉积成因^[4, 10, 15-23]和燕山期岩浆热液成因^[24-28]。铜陵区域内包括冬瓜山铜矿床在内的众多矿床与新桥铜硫铁矿床在矿体产出状态、赋矿层位、控矿因素、成矿规律等多方面都具有一定程度的相似性, 相关的科学疑点也较为相似, 因此对新桥铜硫铁矿床进行成因分析也有利于促进对整个铜陵矿集区成矿机制的研究。本文作者就新桥铜硫铁矿床和矾头复式岩株闪长岩类岩石的常量元素、稀土元素、微量元素和 S、Pb 同位素等开展地球化学特征探讨, 同时结合矿床的地质特征进行成因分析, 旨在为新桥铜硫铁矿床的成因提供地球化学方面的依据。

1 成矿地质背景

新桥铜硫铁矿床位于华北地台与江南地背斜两大构造之间的交接带, 即扬子准地台(III)下扬子拗陷带(III₂)沿江拱断褶带(III₂²)贵池—马鞍山断褶带中部^[2, 7-8, 11]。志留系下统高家边组(S_{1g})至三叠系下统殷坑组(T_{1y})等地层在区内均有出露。其中, 石炭系中统黄龙组(C_{2h})和上统船山组(C_{3c})在矿区内被层状矿体所代替, 是主要的赋矿层位, 而在矿区边部和外围则有分布, 岩性以灰岩为主。上泥盆统五通组(D_{3w})和下石炭统高骊山组(C_{1g})岩性以石英砂岩为主, 构成矿区主要的 1 号层状矿体的底板。下二叠统栖霞组(P_{1q})岩性主要为灰岩和沥青质灰岩, 为矿区的次要赋矿层位, 同时也构成 1 号矿体的顶板。舒家店背斜与大成山背斜枢纽走向均呈 SW 向, 两背斜相向倾伏, 其倾伏端发育有盛冲向斜, 3 个褶皱在空间上组成了一个有利于岩体和矿体就位的“半漏斗”形区域。区内出露的岩体主要为矾头复式岩株, 出露于盛冲向斜核部, 出露面积约 0.5 km², 岩性以石英闪长岩为主。

2 矿床地质特征

新桥铜硫铁矿床大小矿体共计 74 个, 其中以 1

号矿体为主, 其矿石量约占整个矿床总量的近 90%。1 号矿体赋存于五通组(D_{3w})砂页岩与黄龙组(C_{2h})灰岩之间的滑脱破碎带之中, 呈层状、似层状, 走向 NE45°~20°, 倾角 45°~40°, 沿走向长 2 560 m, 沿倾向斜方向长可达 1 810 m(见图 1)。矿体厚度变化规律性强: 在倾向上陡倾斜部分较厚, 缓倾部分较薄, 在倾角陡缓过渡地带厚度一般较大; 在走向上, 平均厚度中间大, 向东厚度剧减, 迅速尖灭, 向西厚度逐渐变薄而近消失。另外, 1 号矿体主要矿物围绕矾头岩株呈现出明显的分带特点, 具体表现为: 矾头岩株→磁铁矿(粒状黄铁矿带)→黄铜矿+粒状黄铁矿带→粒状黄铁矿带。其粒状黄铁矿遍及全矿, 从内到外均为主要组分, 并且呈现由内到外粒度变粗、自形程度增高的规律, 近矾头岩株的地段黄铁矿呈细粒状, 远离矾头岩株的地段则为粗粒状。除 1 号矿体之外, 区内稍具规模的矿体还有 5 号矿体和层状菱铁矿体。

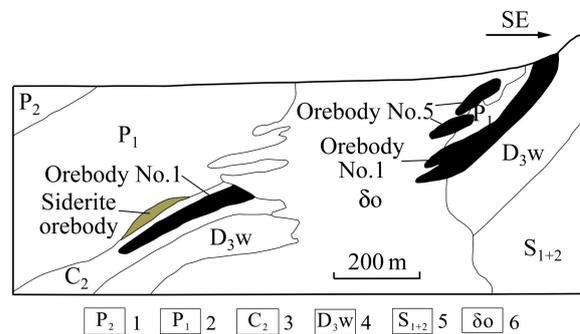


图 1 新桥矿床地质剖面示意图(据臧文控等, 2004)

Fig. 1 Geological section diagram of Xinqiao Cu-S-Fe deposit (after ZHANG et al, 2004): 1—Upper Permian; 2—Lower Permian; 3—Middle Carboniferous; 4—Middle and upper Devonian; 5—Lower Silurian; 6—Diorite

矿石矿物以黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、胶状黄铁矿、菱铁矿和磁黄铁矿等为主; 也有少量方铅矿、闪锌矿、赤铁矿、褐铁矿、镜铁矿以及一些金银类矿物等; 脉石矿物主要为方解石、白云石、绿泥石和石英等, 其次为长石、石榴石和透辉石等。

矿石结构主要为粒状结构(见图 2(a))、交代假象结构(见图 2(a))、交代环边结构(见图 2(b))、胶状结构(见图 2(c))、交代残余结构(见图 2(c)和(d))、共结边结构、网状结构、脉状结构(见图 2(d))、针状结构、条带状结构、层纹状结构、揉皱结构、压碎结构等; 矿石构造主要为浸染状、角砾状、脉状、砂糖状、蜂房状、卷曲状(见图 2(e))、块状(见图 2(f))、晶洞状、网状构造等。

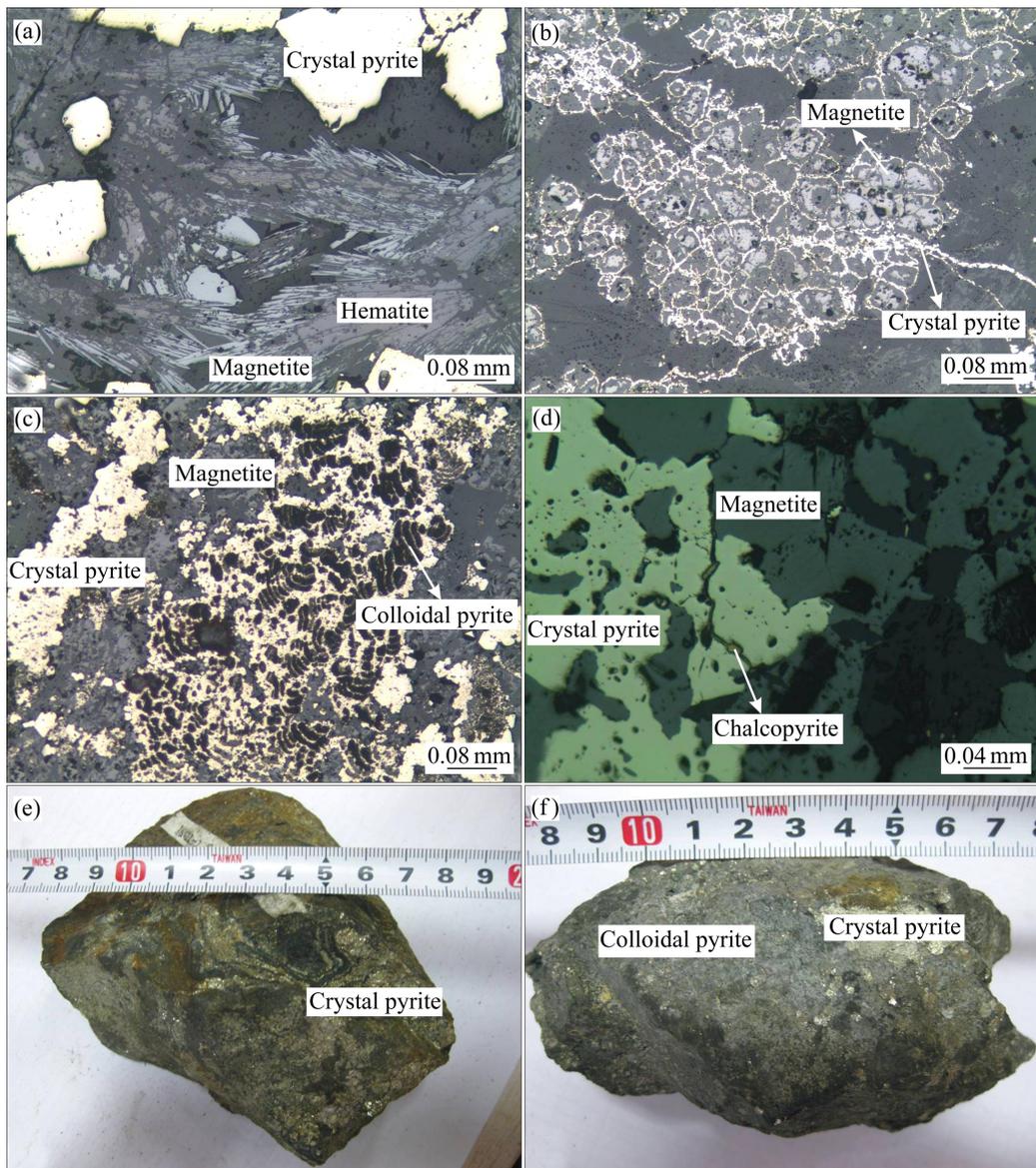


图2 新桥铜硫铁矿床典型矿石结构构造

Fig. 2 Textures and structures of typical ores in Xinqiao Cu-S-Fe deposit: (a) Metasomatic pseudomorph texture; (b) Metasomatic rims texture; (c) Metasomatic relict texture of colloidal pyrite; (d) Metasomatic relict texture of magnetite; (e) Crimp pyrite ore; (f) Colloidal pyrite ore with crystal pyrite

围岩蚀变主要有矽卡岩化(石榴石化、透辉石化、硅灰石化、绿帘石化等)、钾化、硅化、碳酸盐化、绢云母化、高岭土化和绿泥石化等, 矽卡岩化主要出现在矿体与岩体的接触带, 而底板的石英砂岩除了一定程度的硅化外, 未见其他明显的蚀变现象。

3 岩体岩石地球化学特征

3.1 岩体岩石学特征

矿区内的岩体主要为矾头复式岩株, 分布于矿床

中部, 出露面积约 0.5 km^2 。岩体分相明显, 中央相为石英闪长岩, 边缘相为闪长玢岩。

石英闪长岩: 多呈灰色和灰白色, 半自形不等粒状结构。浅色矿物以斜长石为主, 含量多在 40%~60% 之间, 常见聚片双晶结构和环带结构(见图 3(a)和(b)); 钾长石含量相对偏高, 约为 20%, 而石英含量通常为 5%~10% 左右; 暗色矿物以角闪石为主, 含量多在 10%~20% 之间, 黑云母含量较少。副矿物含量较少, 主要为磁铁矿和黄铁矿, 多呈自形粒状结构, 偶见黄铁矿晶粒沿脉串珠状分布。

闪长玢岩: 矾头岩株闪长玢岩多呈灰白色, 斑状

结构。矿物成分主要为角闪石、斜长石、石英和少量不透明矿物。角闪石多构成斑晶, 为半自形-他形短柱状, 粒径约 0.2~1 mm 左右, 含量约 10%; 斜长石按照大小可分为两组: 大者形成斑晶, 其晶型较好, 粒径约 1~2 mm, 含量约 10%; 细者形成基质, 含量约 65%。石英形成基质, 他形粒状, 粒径多为 0.1 mm

左右, 含量约 10%。

3.2 岩体常量元素地球化学特征

本次全岩分析分析选取的样品均采自矾头复式岩株在新桥露天采场的人工出露点, 均为新鲜未蚀变的石英闪长岩, 全岩分析结果及岩石化学特征值见表 1。

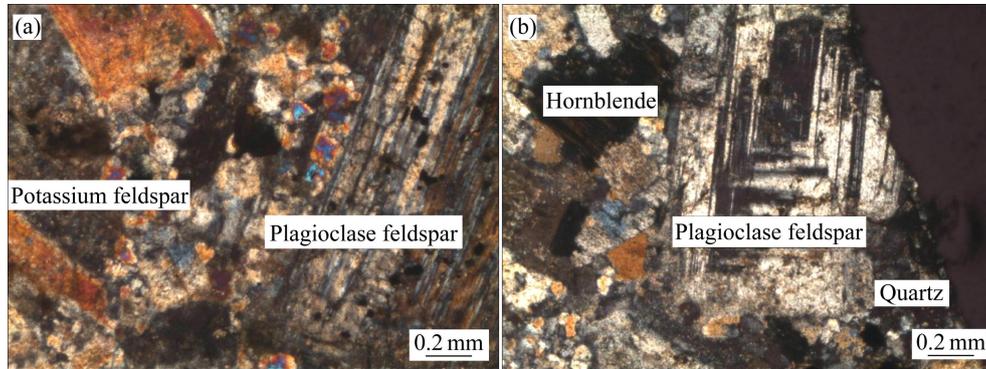


图 3 矾头复式岩株闪长岩类岩石显微镜下照片

Fig.3 Microscope photos of diorites in Jitou Rock Strains: (a) Panidiomorphic texture of potassium feldspar and polysynthetic twin texture of plagioclase feldspar(+); (b) Dissolution texture of hornblende and zoning of plagioclase feldspa(+). ((+)—Orthogonal polarization of microscope)

表 1 新桥矿床矾头岩株石英闪长岩全岩分析结果及岩石化学特征值表

Table 1 Whole-rock analysis and lithochemical features of Jitou rock strains in Xinqiao

Compositional parameter	XQ009	XQ33-1	XQ41-1	Average value
w(SiO ₂)/%	56.59	58.97	61.83	59.13
w(Al ₂ O ₃)/%	16.99	16.31	16.23	16.51
w(TFe ₂ O ₃)/%	5.78	5.74	4.34	5.29
w(CaO)/%	6.66	5.14	4.21	5.34
w(MgO)/%	2.62	1.50	0.94	1.69
w(Na ₂ O)/%	3.68	3.54	3.56	3.59
w(K ₂ O)/%	2.58	2.85	3.52	2.98
w(Cr ₂ O ₃)/%	0.01	0.02	0.01	0.01
w(TiO ₂)/%	0.96	0.72	0.59	0.76
w(MnO)/%	0.13	0.03	0.05	0.07
w(P ₂ O ₅)/%	0.338	0.263	0.200	0.267
w(SrO)/%	0.10	0.08	0.07	0.08
w(BaO)/%	0.09	0.08	0.08	0.08
[w(K ₂ O)+w(Na ₂ O)]/%	6.26	6.39	7.08	6.58
w(K ₂ O)/[w(K ₂ O)+w(Na ₂ O)]	0.41	0.45	0.50	0.45
w(Na ₂ O)/w(K ₂ O)	1.43	1.24	1.01	1.23
AR	1.72	1.85	2.06	1.88
A/NK	1.92	1.83	1.68	1.81
A/CNK	0.81	0.89	0.94	0.88
σ	2.88	2.56	2.66	2.70
τ	13.86	17.74	21.47	17.69

ALS Minerals-ALS Chemex, Guangzhou, China. 2011. AR=[w(Al₂O₃)+w(CaO)+w(Na₂O)+w(K₂O)]/[w(Al₂O₃)+w(CaO)-w(Na₂O)-w(K₂O)]; A/NK=m(Al₂O₃)/[m(Na₂O)+m(K₂O)]; A/CNK=m(Al₂O₃)/[m(CaO)+m(Na₂O)+m(K₂O)]; σ=[w(K₂O)/w(Na₂O)]²/[w(SiO₂)-43]; τ=[w(Al₂O₃)-w(Na₂O)]/w(SiO₂).

石英闪长岩的 SiO_2 平均含量为 59.13%，属于硅酸弱饱和和类岩石；CaO 的平均含量为 5.34%，高于中国同类岩石的平均值(花岗闪长岩 3.70%、石英闪长岩 4.63%)，显示岩浆在成岩过程明显受到钙质围岩的同化混染。

岩石碱总量 $[w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O})]$ 平均值为 6.58%，较中国正常闪长岩值(6.83%)略低； $w(\text{Na}_2\text{O})/ w(\text{K}_2\text{O})$ 值均在 1.01~1.43 之间，平均为 1.23； $w(\text{K}_2\text{O})/[w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O})]$ 值在 0.41~0.50 之间，平均为 0.45；碱度率 AR 在 1.72~2.06 之间，平均值为 1.88；里特曼组合指数(σ)值在 2.56~2.88 之间，平均值为 2.70，属于典型的钙碱性岩， $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$ 图解(见图 4)显示岩石属于高钾钙碱性系列， $w(\text{SiO}_2)-\text{AR}$ 图解(见图 5)显示岩石属于钙碱性岩石。

Barbarin(1999)将钙碱性岩分为 KCG 和 ACG 两类，前者贫 CaO 而富 K_2O ，主要来源于地壳，后者贫 K_2O 而富 CaO，主要来源于地幔^[29-30]。样品的 CaO

含量平均为 5.34%， K_2O 为 2.98%，属于 ACG 类，这也指示了本区岩浆主要来源于上地幔。

新桥码头岩株闪长类岩石的铝过饱和度 A/CNK 值变化在 0.81~0.94，平均值为 0.88，铝碱比 A/NK 为 1.68~1.92，平均值为 1.81。A/NK—A/CNK 图解(见图 6)显示岩石为准铝质，说明本区起源于上地幔的原始岩浆，在岩浆的成岩演化过程中受到过上地壳的同化混染。

在戈蒂尼指数(τ)与里特曼指数(σ)对数值的关系图(见图 7)上，所有的样品点均落入 B 区，说明本区岩体形成于造山带，这符合铜陵地区为造山期后块断隆起区的大地构造环境。

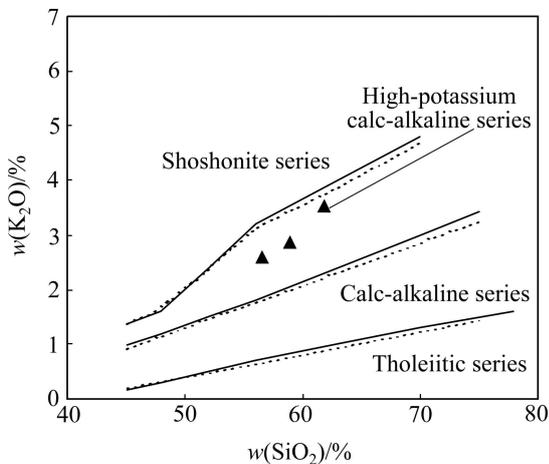


图 4 新桥矿区岩浆岩 $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$ 图
Fig. 4 $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{SiO}_2)$ plots of Jitou rock strain

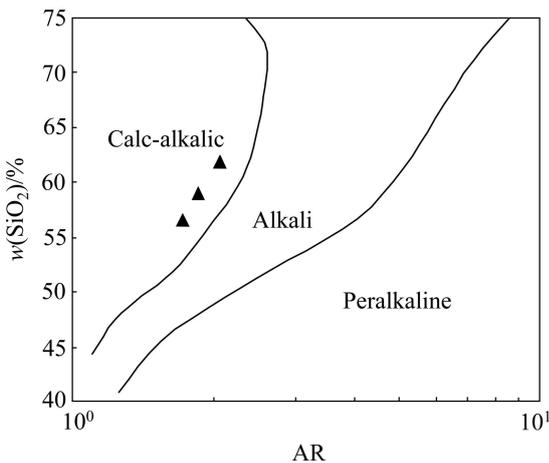


图 5 新桥矿区岩浆岩 $w(\text{SiO}_2)-\text{AR}$ 图
Fig. 5 $w(\text{SiO}_2)-\text{AR}$ curves of Jitou rock strains

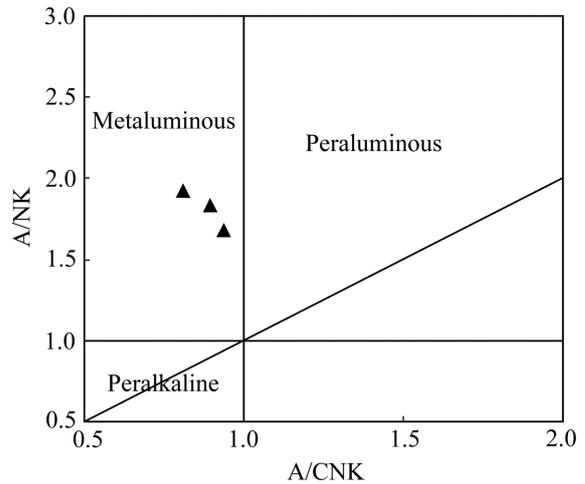


图 6 新桥矿区岩浆岩 A/NK—A/CNK 图
Fig. 6 A/NK—A/CNK plots of Jitou rock strains

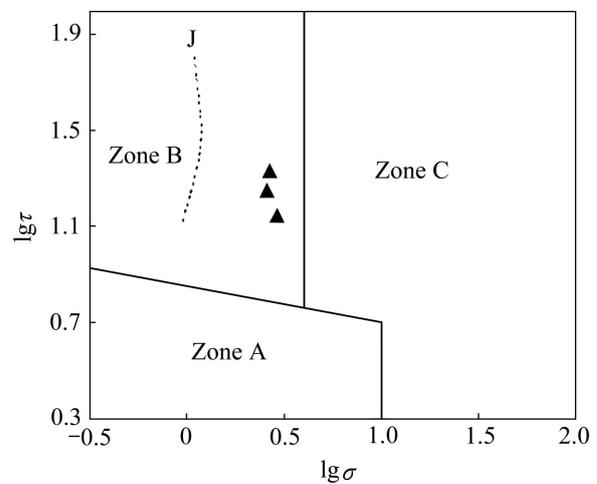


图 7 新桥矿区岩浆岩 $\lg \tau - \lg \sigma$ 曲线
Fig. 7 $\lg \tau - \lg \sigma$ curves of Jitou rock strains: Zone A—Volcanic rock of nonorogenic belt; Zone B—Volcanic rock of orogenic belt; Zone C—Induced alkalic rock between A and B; J—Volcanic in Japan

3.3 岩体稀土元素地球化学特征

稀土元素分析选取的样品均采自矾头复式岩株在新桥露天采场的人工出露点, 均为新鲜未蚀变的石英闪长岩或闪长玢岩, 稀土元素分析结果及经赫尔曼(1971)球粒陨石平均含量标准化所得到的稀土特征值见表 2。

稀土元素配分模式图(见图 8)显示所有样品的配分曲线均向右倾, 轻稀土部分的斜率大于重稀土部分, 属轻稀土富集型, 为同源岩浆演化。稀土总量(ΣREE)都在 $170.54 \times 10^{-6} \sim 213.14 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 194.35×10^{-6} , 低于世界花岗质岩石的稀土元素平均含量(292×10^{-6})。轻重稀土比($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$)介于 9.84~13.00 之间, 平均为 11.73, 轻重稀土比远大于 1, 轻稀土强烈富集, 暗示岩浆在就位过程中受到过上地壳物质的混染。另外, 样品铈异常不明显。岩体以上的这些特征与董耀松等^[31](2004)提出的地幔部分熔融产物形成岩石的稀土元素特征相吻合, 说明新桥矿区矾头岩株为地幔部分熔融的产物。

$w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$ 值变化范围为 3.32~6.65, 平均值为 4.68, 说明轻稀土元素内部也具有明显的分异作用; $w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N$ 值范围为 0.85~1.46, 平均值为 1.24, 小于 $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$ 值, 重稀土分馏程度较低, 衰减速率慢于轻稀土。铈异常(δEu)值均在 0.90~0.98 之间, 平均值为 0.94, 铈谷不明显, 属球粒陨石型, 说明岩浆岩在形成期间斜长石分离结晶作用不明显; 铈异常(δCe)值变化范围为 0.78~0.82, 平均为 0.81, 铈谷不明显, 属铈正常型, 反映了表层风化作用对岩石的影响较小。

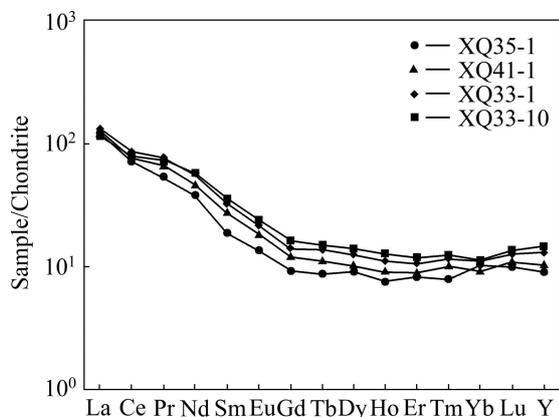


图 8 新桥矿区岩体稀土元素配分模式图
Fig. 8 REE distribution modes of Jitou rock strains in Xinqiao

岩体 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N - \delta(\text{Eu})$ 变异图(见图 9)显示, 所有样品点均落在壳幔型区域, 这与岩体常量元素特

征显示出的岩体属于钙碱性 ACG 类, 形成于上地幔, 但在成岩演化过程中受到地壳物质混染的结论相吻合, 也与臧文拴等^[9](2007)对新桥矿区矾头岩株 Pb 同位素组成分析的结果一致。在 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N - \Sigma\text{REE}$ 图上(见图 10), 新桥矿区岩体的落点均在玄武岩区域的碱性玄武岩区域, 指示矿区的侵入岩原始岩浆可能是来自上地幔的碱性玄武岩浆。

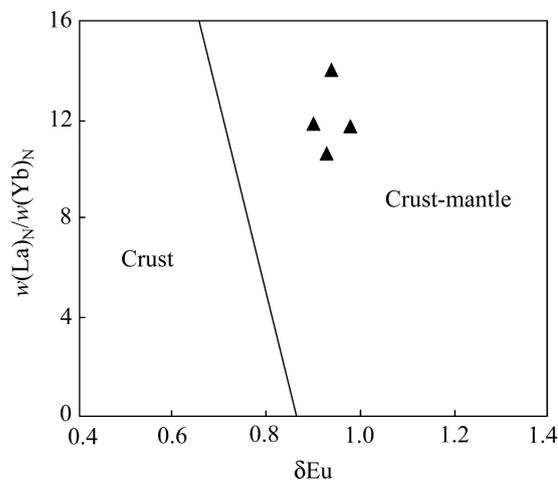


图 9 新桥矿区岩体 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N - \delta(\text{Eu})$ 变异图
Fig. 9 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N - \delta(\text{Eu})$ relationship map of Jitou rock strains

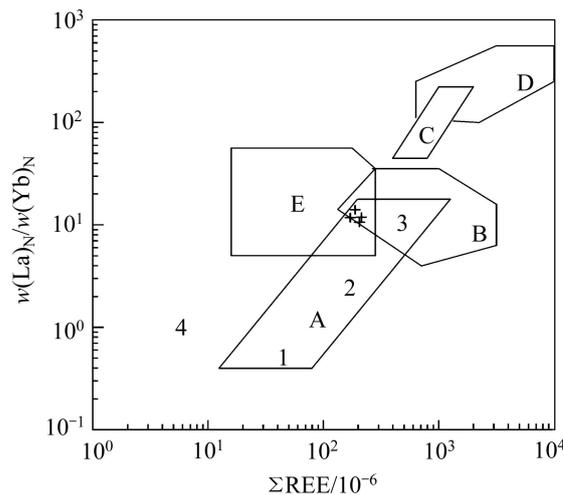


图 10 新桥矿区岩体 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N - \Sigma\text{REE}$ 图
Fig. 10 $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N - \Sigma\text{REE}$ relationship map of Jitou rock strains: A—Basalt; 1—Oceanic tholeiite, 2—Continental tholeiitic basalt, 3—Blkali basalt; B—Granite; C—Kimberlite; D—Carbonate rocks; E—Carbonaceous mudstone; 4—Chondrite

3.4 岩体微量元素地球化学特征

微量元素分析选取的样品均采自矾头复式岩株在新桥露天采场的人工出露点, 均为新鲜未蚀变的石英闪长岩或闪长玢岩, 微量元素分析结果见表 2。

表2 新桥矿区岩体微量元素含量及特征值

Table 2 Contents of trace elements and characteristic values of Jitou rock strains in Xinqiao ($w_B, 10^{-6}$)

Trace element or characteristic value	XQ33-1	XQ33-10	XQ35-1	XQ41-1	Average value	Vickers value (1962)
	Quartz diorite	Quartz diorite	Diorite porphyry	Quartz diorite		
La	41.8	37.3	39.9	41.2	40.1	
Ce	79.3	72.3	67.9	71.8	72.8	
Pr	9.17	8.59	6.48	7.97	8.05	
Nd	33.9	33.7	22.9	27.9	29.6	
Sm	6.59	7.03	3.75	5.37	5.69	
Eu	1.56	1.74	0.99	1.33	1.41	
Gd	4.45	4.99	2.80	3.75	4.00	
Tb	0.70	0.75	0.43	0.55	0.61	
Dy	3.94	4.27	2.81	3.15	3.54	
Ho	0.82	0.91	0.55	0.67	0.74	
Er	2.24	2.48	1.75	1.82	2.07	
Tm	0.39	0.41	0.26	0.33	0.35	
Yb	2.09	2.09	2.01	1.74	1.98	
Lu	0.39	0.42	0.31	0.34	0.37	
Y	25.8	28.3	17.7	20.5	23.1	
W	1	1	1	2	1	1.3
Sn	4	9	1	2	4	25
Mo	3	8	2	4	4	1.1
Cu	427	106	9	26	142	47
Pb	13	15	43	16	22	15
Zn	33	80	314	40	117	83
Ag	1	1	1	1	1	0.07
V	95	162	37	76	93	90
Cr	10	20	10	20	15	83
Co	8.1	7.3	2.5	7.9	6.5	18
Ni	6	10	5	5	7	58
Ba	677.0	2370.0	211.0	809.0	1017.0	650.0
Sr	783.0	1605.0	78.0	683.0	787.0	340.0
Cs	2.78	7.59	14	4.12	7.20	3.70
Ga	21.1	21.2	18.0	19.6	20.0	19
Hf	5.0	4.5	5.0	4.8	4.8	1.0
Nb	14.3	11.7	15.0	12.9	13.4	20
Rb	93.0	72.9	245.0	123.0	133.0	150.0
Ta	1.0	0.7	1.0	1.0	0.9	2.5
Th	12.70	7.37	16.00	14.20	12.50	13.00
Tl	0.5	0.5	1.6	0.5	0.8	1.0
U	3.73	3.86	3.70	4.66	3.99	2.50
Zr	192	169	195	182	185	170
Σ LREE	172.32	160.66	141.92	155.57	157.62	
Σ HREE	15.02	16.32	10.92	12.35	13.65	
Σ REE	213.14	205.28	170.54	188.42	194.35	
Σ (La-Nd)	87.00	86.00	90.00	88.00	87.75	
Σ (Sm-Ho)	10.00	11.00	7.00	9.00	9.25	
Σ (Er-Lu)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	
Σ LREE/ Σ HREE	11.47	9.84	13.00	12.60	11.73	
δ Eu	0.90	0.93	0.98	0.94	0.94	
δ Ce	0.81	0.82	0.81	0.78	0.81	
$w(\text{Ce})_N/w(\text{Yb})_N$	7.67	6.99	6.83	8.34	7.46	
$w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$	11.88	10.60	11.79	14.05	12.08	
$w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$	3.96	3.32	6.65	4.80	4.68	
$w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N$	1.30	1.46	0.85	1.32	1.24	
$w(\text{Eu})/w(\text{Sm})$	0.65	0.68	0.72	0.68	0.68	
$w(\text{Sm})/w(\text{Nd})$	0.58	0.63	0.49	0.58	0.57	

Test unit: ALS Minerals-ALS Chemex, Guangzhou, China. 2011

新桥矿区岩体的微量元素测试结果表明,元素 Sr 含量较高,其平均值为 787.0×10^{-6} ,均远高于维氏值,远高于上地壳值 (350.0×10^{-6}) 和下地壳值 (230.0×10^{-6}),因此,新桥岩体不可能是地壳岩石深熔或重熔的产物,而元素 Cu 的平均含量达 142×10^{-6} ,远高于维氏值,其强烈富集说明岩体有为成矿提供物质来源的潜力,暗示成矿物质来源于岩浆的可能。

微量元素原始地幔标准化[标准化所用原始地幔平均含量据蛛网图(见图 11)显示,新桥矿区闪长岩总体上显示出较为一致的分配模式,曲线整体上呈右倾趋势,表现出大离子亲石元素(LILE)的相对富集和高场强元素(HFSE)的相对亏损,且均表现出 Nb、Ta、Ti 的显著亏损和 Pb 的正异常。Nb、Ta 的显著亏损,说明岩体是岛弧岩浆作用的直接产物,且在岩浆上升过程受到了地壳物质的混染或源区受到俯冲洋壳物质的交代作用, Ti 的富集是地幔岩石的显著性质,而新桥闪长岩 Ti 的亏损也说明其在演化成岩过程中受到了同化混染作用。

DUNGAN 等^[32]通过研究提出地壳的 $w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 比值通常为 1.5~2.2,而地幔物质的 $w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 比值则为 0.98~1.00。本区 4 个样品的 $w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 值范围为 8.31~9.98,平均值为 9.35,均明显高于地壳和地幔的 $w(\text{La})/w(\text{Nb})$ 比值,说明新桥矾头岩株来源的不单一性。样品 $w(\text{Nb})/w(\text{U})$ 比值为 2.27~4.05(平均值为 3.42),低于原始地幔值(34)和陆壳平均值(8)^[33-34], $w(\text{Nb})/w(\text{Pb})$ 平均值 0.76 低于大陆地壳值(1.6)和洋中脊玄武岩值(25)^[33-34],这都说明了新桥矾头岩株的壳幔型性质。

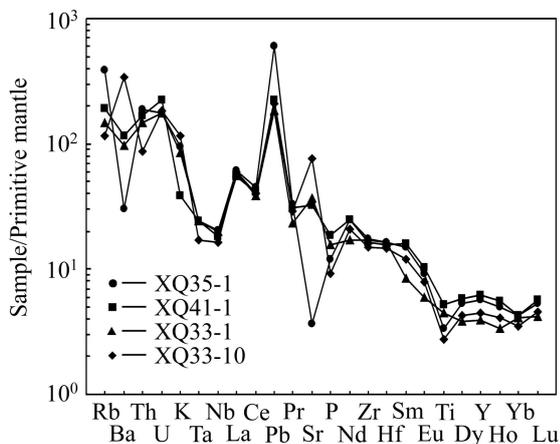


图 11 微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 11 Original mantle standardization web map of trace elements

4 矿床地球化学特征

4.1 矿床稀土元素地球化学特征

选取新桥 1 号矿体中的岩体、矽卡岩、矿石、围岩(灰岩)样品进行稀土元素测试分析。测试结果(见表 3)表明:岩体、矽卡岩、矿体和围岩的 ΣREE 平均值依次为 207.43、118.61、112.45 和 33.65,其随着岩体→矽卡岩→矿体→围岩顺序依次减小,而且矿石与岩体和矽卡岩的值较为接近,而与围岩的值相差较大。

经赫尔曼球粒陨石平均值标准化后作出的稀土元素配分图(见图 12)表明:11 个样品的配分曲线均显示出右倾的特点,轻稀土部分相对较陡,而重稀土部分趋于平缓,属于轻稀土富集型;矿石样品的配分曲线整体上与矽卡岩和岩体的曲线形态相近,重稀土部分近于重合,而与围岩的配分曲线存在较大的差别;蚀变矿化闪长岩和新鲜闪长岩的配分曲线近于一致,具有近乎一致的稀土元素地球化学特点,这说明闪长岩发生的蚀变和矿化为闪长岩同期岩浆热液所致,后期可能不存在外来热液或后期外来热液对其影响不大。另外,除矿石样品 XQ47-5 外,各样品的分配曲线均具有“铈谷”,表现出 Ce 的亏损,其围岩 Ce 亏损最为明显。岩体(含蚀变岩体)和矽卡岩的 Eu 无明显异常,其 δEu 分别为 0.85~0.93 和 1.04~1.05,均趋近于 1;矿体则表现出明显的铈正异常,其 δEu 为 1.61~1.90;围岩呈现弱铈正异常,其 δEu 为 0.81~0.85。

4.2 矿床微量元素地球化学特征

1 号矿体的矿石、矽卡岩、蚀变岩体、岩体和围岩的 W、Sn、Cu、Pb、Zn、Ag 等 6 种元素测试结果见表 4,用其平均含量作柱状对比图(见图 13)进行分析。元素 W 和 Sn 在矿石中的含量与在矽卡岩中的非常接近,虽然与岩体(包含蚀变岩体)和围岩中的含量差别较大,但相对而言更接近岩体中的含量(见图 13(a)和(b));元素 Cu 在 5 类地质体中的含量从矿石→矽卡岩→岩体(包含蚀变岩体)→围岩依次降低,但是 Cu 在岩体(包含蚀变岩体)中的含量明显高于维氏值(见图 13(c));元素 Pb 和 Ag(Ag 含量低于检测限的以检测限作图)在矿石、矽卡岩和岩体(包含蚀变岩体)中的含量非常稳定,而且远低于围岩中的相对含量(见图 13(d)和(f));元素 Zn 在矽卡岩中的含量最高,在其余 4 类地质体中的含量相当,但相对而言,矿石中的含量更接近岩体(包含蚀变岩体)中的含量(见图 13(e))。总体而言,与其他岩石的主要成矿元素含量相比,矽卡岩和岩体的主要成矿元素含量均更接近矿石。

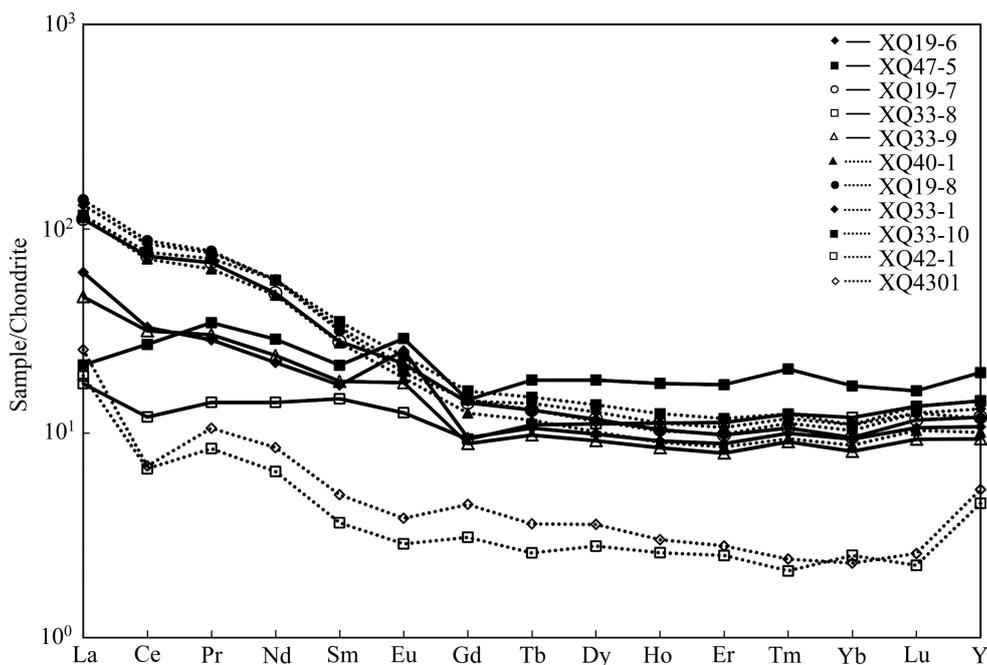


图 12 新桥矿区 1 号矿体稀土元素配分模式图

Fig. 12 REE distribution mode of Orebody No.1 in Xinqiao

表 3 新桥矿床 1 号矿体稀土元素原始值

Table 3 Contents of REE of Orebody No.1 in Xinqiao

Sample	Name	w/10 ⁻⁶														
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
XQ19-6	Pyrite ore	19.6	31.0	3.43	13.3	3.44	1.85	2.95	0.53	3.07	0.67	1.87	0.33	1.78	0.33	21.1
XQ47-5	Pyrite ore with quartz	6.9	25.6	4.17	17.3	4.30	2.12	4.51	0.91	5.65	1.28	3.63	0.68	3.24	0.50	38.8
XQ19-7	Skarn with pyrite	35.7	69.2	8.21	29.1	5.61	1.60	4.37	0.65	3.63	0.76	2.06	0.35	1.81	0.36	23.5
XQ33-8	Skarn with pyrite	5.6	11.3	1.70	8.5	2.95	0.92	2.90	0.55	3.45	0.82	2.37	0.41	2.27	0.42	28.2
XQ33-9	Altered skarn	14.9	29.8	3.64	14.4	3.59	1.29	2.76	0.49	2.85	0.62	1.68	0.30	1.55	0.29	18.4
XQ40-1	Altered quartz diorite	36.4	66.9	7.64	28.4	5.54	1.36	3.89	0.58	3.15	0.66	1.80	0.31	1.66	0.32	19.8
XQ19-8	Altered quartz diorite	44.4	82.4	9.34	33.5	6.34	1.44	4.51	0.65	3.55	0.75	2.08	0.37	1.96	0.39	23.2
XQ33-1	Quartz diorite	41.8	79.3	9.17	33.9	6.59	1.56	4.45	0.70	3.94	0.82	2.24	0.39	2.09	0.39	25.8
XQ33-10	Quartz diorite	37.3	72.3	8.59	33.7	7.03	1.74	4.99	0.75	4.27	0.91	2.48	0.41	2.09	0.42	28.3
XQ42-1	Altered limestone	6.1	6.3	1.01	3.9	0.73	0.21	0.96	0.13	0.87	0.19	0.53	0.07	0.48	0.07	8.9
XQ43-1	Limestone	8.2	6.5	1.27	5.1	1.00	0.28	1.39	0.18	1.11	0.22	0.59	0.08	0.44	0.08	10.4

Test unit: ALS Minerals – ALS Chemex, Guangzhou, China. 2011

表4 新桥矿床1号矿体微量元素含量

Table 4 Contents of trace elements of Orebody No.1 in Xinqiao

Type	Sample	Name	w/10 ⁻⁶					
			W	Sn	Cu	Pb	Zn	Ag
Ore	XQ19-6	Pyrite ore	3	51	830	6	58	<1
	XQ47-5	Pyrite ore with quartz	32	52	833	12	31	<1
	XQ33-12	Magnetite-pyrite ore	8	10	349	47	197	<1
	XQ45-1	Chalcopyrite -pyrite ore	17	5	2190	7	5	<1
	Average value		15	30	1051	18	73	<1
Skarn	XQ19-7	Skarn with pyrite	5	9	163	6	63	<1
	XQ33-8	Skarn with pyrite	23	46	636	10	161	<1
	XQ33-9	Altered skarn	10	25	965	19	97	<1
	Average value		13	27	588	12	107	<1
Altered magmatite	XQ40-1	Altered quartz diorite	1	2	122	19	94	<1
	XQ19-8	Altered quartz diorite	7	3	267	7	34	<1
	Average value		4	3	195	13	64	<1
Fresh magmatite	XQ33-1	Quartz diorite	<1	4	427	13	33	<1
	XQ33-10	Quartz diorite	<1	9	106	15	80	<1
	Average value		<1	7	267	14	57	<1
Wall rock	XQ42-1	Altered limestone	3	<1	68	104	77	18
	XQ43-1	Limestone	2	<1	28	21	22	<1
	Average value		3	<1	48	63	50	10

Test unit: ALS Minerals – ALS Chemex, Guangzhou, China. 2011

5 控矿因素分析

有利层位: 1号矿体赋存的石炭系船山组和黄龙组地层岩性均以灰岩为主,其渗透性较好、化学性质活泼,易于与成矿热液发生交代作用形成矿体。

岩浆: 矾头复式岩株的岩性以闪长岩为主,其对应的岩浆热液易与船山组和黄龙组的灰岩发生化学反应,而且其Cu元素的强烈富集说明其有为成矿作用提供铜源的潜力。

有利赋矿空间: 石炭系船山组和黄龙组地层的灰岩岩性与上泥盆统五通组(D₃w)地层的石英砂岩岩性机械性能差异大,在多次构造活动中易于产生层间破碎和滑脱空间,为矿液的运移和沉淀提供了良好的空间。

有利构造: 盛冲向斜、舒家店背斜和大成山背斜组成的半漏斗形区域则为岩体的就位提供了空间条件。同时,三褶皱的多期次活动,使得船山组和黄龙组地层与上泥盆统五通组(D₃w)地层之间的层间破碎

和滑脱空间进一步扩大,为矿体的就位进一步提供良好空间。

隔挡层: 矿体的底板为上泥盆统五通组(D₃w)或下石炭统高骊山组(C₁g),其岩性均为石英砂岩,其渗透性较差,化学性质稳定,这有利于含矿热液的储存,为矿质的沉淀、富集提供了良好的条件。

6 矿床成因分析

由于对成矿时代、成矿物质来源和矿区典型的胶状黄铁矿成因等方面的认识存在不足,使得新桥铜硫铁矿床成因一直处于同生沉积—岩浆热液改造成因^[3, 12-14]、海西期海底喷流沉积成因^[4, 10, 15-23]和燕山期岩浆热液成因^[24-28] 3种观点的争论之中。本文作者结合对新桥铜硫铁矿床的控矿因素分析,对其岩体地球化学特征、矿石结构构造、围岩蚀变、矿石矿物分带特征、矿床地球化学特征、成矿物质来源以及与典型Sedex矿床和矽卡岩型矿床的对比做出如下总结。

岩体地球化学特征: 矾头复式岩株的闪长岩类岩

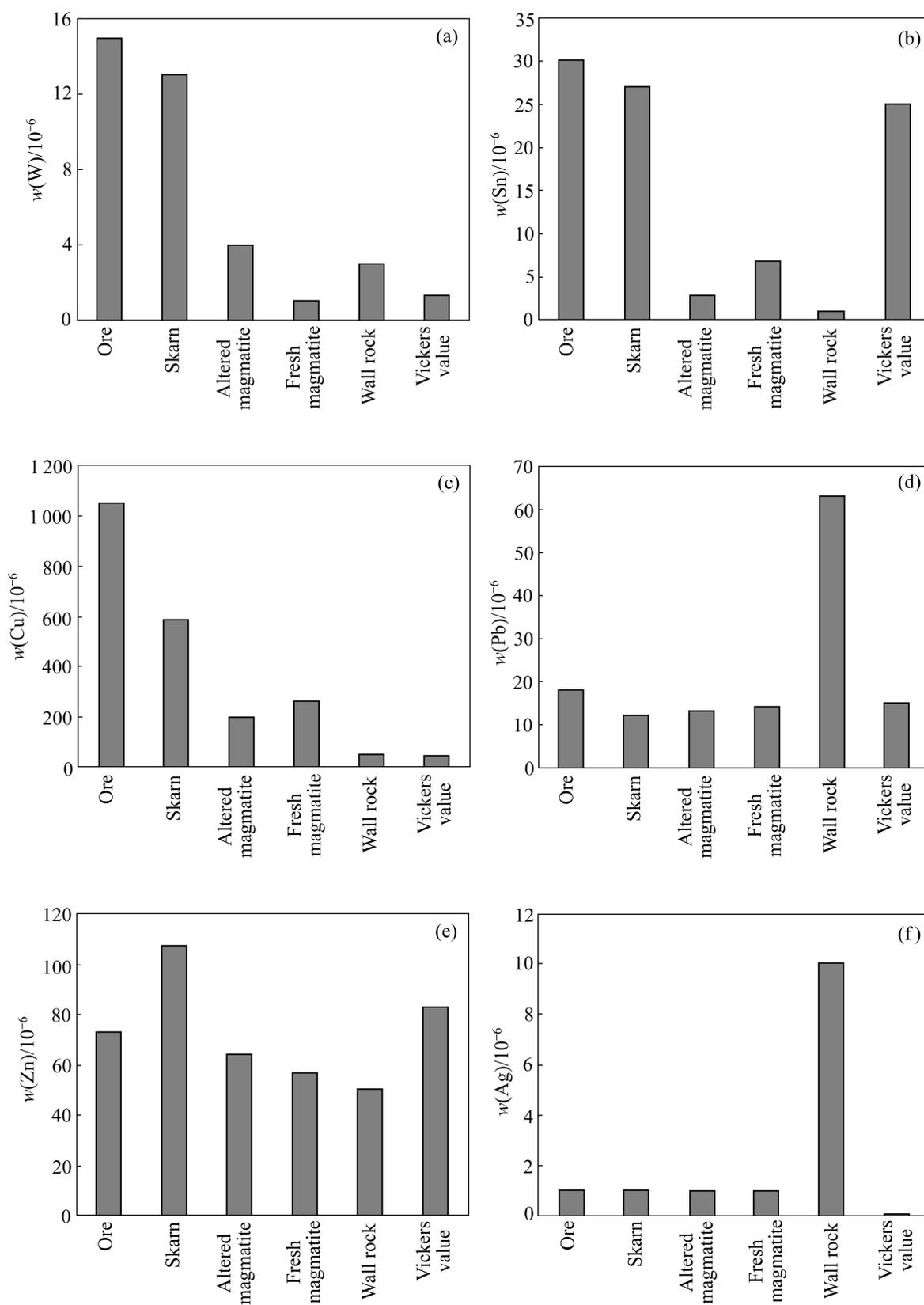


图 13 新桥矿区 1 号矿体主要成矿元素平均含量对比

Fig. 13 Comparison of average contents of main metallogenic elements of Orebody No.1 in Xianqiao: (a) W; (b) Sn; (c) Cu; (d) Pb; (e) Zn; (f) Ag

石属于硅酸弱饱和和类钙碱性准铝质岩石,其对应的岩浆热液非常有利于与船山组 and 黄龙组等碳酸盐地层发生交代反应。矾头复式岩株中 Cu 元素强烈富集也说明岩浆具备提供成矿物质的潜力。

矿石结构构造: 1号矿体中矿石矿物的交代结构十分发育,说明矿床的热液成矿特征十分明显,而且成矿作用应以接触交代作用为主。浸染状、脉状、卷曲状、块状、晶洞状等构造属于接触交代型矿床常见的矿石构造。

围岩蚀变: 围岩蚀变以石榴石化、透辉石化、硅灰石化、绿帘石化等矽卡岩化为主,而且主要出现在矿体与岩体的接触带,反应了三者之间在空间上的亲缘性。

矿石矿物分带特征: 1号矿体主要矿石矿物围绕矾头岩株呈现出的明显分带与典型的岩浆热液矿床的温度分带一致,即近岩体区域形成中高温矿物(磁铁矿),远离岩体的区域则形成中低温矿物,这也暗示岩体与成矿之间的密切关系。

矿床地球化学特征: 新桥铜硫铁矿床具有如下矿床地球化学特征: 矿石与岩体和矽卡岩的 ΣREE 平均值较为接近,而与围岩的值相差较大; 矿石样品的配分曲线整体上与矽卡岩和岩体的曲线形态相近; 矽卡岩和岩体的主要成矿元素含量均较其他岩石更接近矿石。这些特征都显示出矿石与岩体和矽卡岩之间具有一定的亲缘性,突出岩体对成矿的重要性。

成矿物质来源: S 和 Pb 同位素的组成说明成矿物质主要来自于岩浆^[6, 8-10, 14, 35], 这符合矾头复式岩株中 Cu 元素的强烈富集特征。石英和方解石的氢氧同位素证实矿床的成矿热液为岩浆水^[5, 36], 这都说明岩浆是区内成矿的必要因素,其对应的岩浆热液活动提供了主要的成矿物质、成矿流体和热量。

与典型矿床的对比: 将新桥铜硫铁矿床与典型的 Sedex 型矿床——美国红狗超大型铅锌矿床和典型的矽卡岩型矿床——湖北大冶铁矿床进行比较,发现新桥铜硫铁矿床明显有别于美国红狗超大型铅锌矿床,而与大冶铁矿床存在类似(表 5)。

表 5 新桥铜硫铁矿床与典型 Sedex 型矿床和矽卡岩型矿床的比较

Table 5 Comparison among typical Sedex type deposit, skarn type deposit and Xinqiao Cu-S-Fe deposit

Item	Red Dog Zn-Pb-Ag deposit	Xinqiao Cu-S-Fe deposit	Daye Fe deposit
Wall rock	Black organic-rich and calcareous mudstone, shale ^[37]	Limestone in C ₂₊₃	Limestone in Group Daye, Lower Triassic ^[41]
Effect of magma to mineralization	No decisive effect ^[38]	Jitou rock strains and mineralization closely related	Daye Batholith and mineralization closely related ^[42]
Metallogenic element	Mainly Pb and Zn with a small amount of Cu and Ag, but without Au ^[39]	Mainly S, Fe and Cu, with a small amount of Au	Mainly Fe and Cu ^[41]
Mineralization zoning	Zoning of Cu-Zn-Pb-Ba(Fe) from bottom to top ^[40]	Zoning of Fe+S-Cu+S-S from Jitou Rock Strains to outside	Zoning of Fe-Fe+Cu-Cu from top to bottom ^[42]
Structure of ore	Mainly block, stockwork, disorder and kataclastic structures ^[37] ,	Mainly block, disseminated, brecciated, stockwork, curled, honeycomb, vein, miarolitic structures	Mainly block, disseminated, brecciated structures ^[41]
Texture of ore	Mainly zonal, granular and mosaic textures ^[38]	Granular, metasomatic, colloidal textures	Mainly metasomatic texture ^[41]
Wall rock alteration	Silicification, vulcanization materialized, chertification and barite ^[38]	Mainly skarn lithification, silicification, carbonatization, sericitization, kaolinization and chloritization	Skarn lithification, epidotization, albitization, carbonatization, and so on ^[41]
Source of ore-forming material	Ancient rocks of Shield ^[38]	Mainly magma	Mainly magma ^[41]
Source of ore-forming fluid	Seawater ^[40]	Magma ^[5, 36]	Magma ^[42]

胶状黄铁矿成因研究一直是新桥铜硫铁矿床成因研究的一大瓶颈,但电子探针分析结果表明,新桥铜硫铁矿床的胶状黄铁矿应属于热液成因,而不是同生沉积和海底喷流沉积所形成^[43],这也间接否定同生沉积—热液改造和海底喷流沉积两种成因观点。

综合上述观点认为,新桥铜硫铁矿床应属于以接触交代作用为主的矽卡岩型铜硫铁矿床。

7 结论

1) 矾头复式岩株的闪长岩类岩石属于硅酸弱饱和和类钙碱性准铝质岩石,贫 K_2O 而富 CaO , 属于钙碱性岩中的 ACG 类,指示本区岩浆主要来源于上地幔,而元素 Nb 和 Ta 与原始地幔标准值相比,显著亏损,说明岩体是岛弧岩浆作用的直接产物,且在岩浆上升过程受到了地壳物质的混染。

2) 新桥 1 号矿体中,矿石的 ΣREE 值接近岩体和矽卡岩的 ΣREE 值,而与围岩的相差较大;矿石稀土配分曲线形态整体上接近矽卡岩和岩体,而与围岩差别较大;矿石中 W、Sn、Cu、Pb、Zn、Ag 等 6 种微量元素含量最接近矽卡岩,其次是岩体,而与围岩中的含量差别较大。说明矿石与岩体和矽卡岩具有一定的亲缘性,而与围岩关系不大。

3) 矾头复式岩株中 Cu 元素的强烈富集说明岩浆具备提供成矿物质的潜力。

4) 岩浆是区内成矿的必要因素,其对应的岩浆热液活动提供了主要的成矿物质、成矿流体和热量,新桥铜硫铁矿床应是以接触交代作用为主的矽卡岩型铜硫铁矿床。

REFERENCES

- [1] 张德贵. 安徽最大铜硫矿床地质概要——论新桥铜硫铁矿床的成因[J]. 地质科技情报, 1982(S1): 73-75.
ZHANG De-gui. Geological summary of the largest copper sulfur deposit in Anhui Province: Genesis of Xinqiao Cu-S-Fe deposit[J]. Geological Science and Technology Information, 1982(S1): 73-75.
- [2] 王恩德, 王荣湖. 铜陵新桥铁帽金矿床中金赋存特征及富集规律[J]. 沈阳黄金学院学报, 1991, 10(3): 1-10.
WANG En-de, WANG Rong-hu. The occurrence characteristics and enrichment regularity of gold in the gossan-type gold deposit of Xinqiao, Tongling[J]. Journal of Shenyang Institute of Gold Technology, 1991, 10(3): 1-10.
- [3] 谢华光, 王文斌, 李文达. 安徽新桥铜硫矿床成矿时代及成矿物质来源[J]. 火山地质与矿产, 1995, 16(2): 101-107.
XIE Hua-guang, WANG Wen-bin, LI Wen-da. The genesis and metallogenetic of Xinqiao Cu-S Deposit, Anhui Province[J]. Volcanology & Mineral Resources, 1995, 16(2): 101-107.
- [4] 周涛发, 岳书仓. 长假中下游两个系列铜金矿床成矿流体系统的形成条件及机理[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2000, 36(5): 697-707.
ZHOU Tao-fa, YUE Shu-cang. Ore-forming fluid system formation conditions and mechanism of two series of copper gold deposit in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Journal of Peking University: Natural Science Edition, 2000, 36(5): 697-707.
- [5] 刘心兵. 新桥硫铁矿床地质特征及控矿因素分析[J]. 矿业快报, 2002(22): 13-15.
LIU Xin-bin. Geological characteristics and ore-controlling factor analysis of Xinqiao S-Fe deposit[J]. Express Information of Mining Industry, 2002(22): 13-15.
- [6] 陈彬. 新桥硫—多金属矿床含硫磁铁矿体地质特征及成因探讨[J]. 化工矿产地质, 2003, 25(3): 173-178.
CHEN Bin. Geological features and genetic study of the containing sulfur-magnetite orebody of Xinqiao deposit[J]. Geology of Chemical Minerals, 2003, 25(3): 173-178.
- [7] 王彦斌, 唐索寒, 王进辉, 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 田世洪. 安徽铜陵新桥铜金矿床黄铁矿 Rb/Sr 同位素年龄数据——燕山晚期成矿作用的证据[J]. 地质论评, 2004, 50(5): 538-541.
WANG Yan-bin, TANG Suo-han, WANG Jin-hui, ZENG Pu-sheng, YANG Zhu-sen, MENG Yi-feng, TIAN Shi-hong. Rb-Sr dating the pyrite of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit, Tongling, Anhui Province[J]. Geological Review, 2004, 50(5): 538-541.
- [8] 臧文拴, 吴淦国, 张达, 刘爱华. 铜陵新桥铁矿田地质地球化学特征及成因浅析[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(2): 187-193.
ZANG Wen-shuan, WU Gan-guo, ZHANG Da, LIU Ai-hua. Geological and geochemical characteristics and genetic analyses of Xinqiao iron orefield, Tongling[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(2): 187-193.
- [9] 臧文拴, 吴淦国, 张达, 张祥信, 李进文, 刘爱华, 张忠义. 浅析安徽省新桥 S-Fe 矿田的成因[J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 464-474.
ZANG Wen-shuan, WU Gan-guo, ZHANG Da, ZHANG Xiang-xin, LI Jin-wen, LIU Ai-hua, ZHANG Zhong-yi. A preliminary discussion on genesis of Xinqiao S-Fe orefield[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(4): 464-474.
- [10] 李红阳, 李英杰, 侯增谦, 杨竹森, 蒙义峰, 曾普胜, 徐文艺. 安徽新桥块状硫化物矿床地球化学特征[J]. 地质科学, 2005, 40(3): 337-345.
LI Hong-yang, LI Ying-jie, HOU Zeng-qian, YANG Zhu-sen, MENG Yi-feng, ZENG Pu-sheng, XU Weng-yi. Geochemical features of the Xinqiao massive sulfide deposit in Anhui

- Province[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(3): 337-345.
- [11] 徐应龙, 郭继伟. 安徽省铜陵县新桥铁帽金银矿床地球化学特征[J]. 现代矿业, 2009(8): 92-95.
XU Ying-long, GUO Ji-wei. Geochemical characteristics of Xinqiao gossan-Au-Ag deposit in Tongling, Anhui Province[J]. Modern Mining, 2009(8): 92-95.
- [12] 杨道斐, 傅德鑫, 吴履秀. 从矿石成分及结构构造特征看新桥及其邻近地区黄铁矿型铜矿床的成因[J]. 资源调查与环境, 1982, 3(4): 59-68.
YANG Dao-fei, FU De-xin, WU Nü-xiu. Genesis of copper deposit with pyrite in Xinqiao and its neighboring region according to ore composition and structure[J]. Resources Survey and Environment, 1982, 3(4): 59-68.
- [13] 刘裕庆. 铜陵地区层状铜(铁硫)矿床同位素地球化学研究[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 47-82.
LIU Yu-qin. Isotope geochemical research of blanket Cu(-Fe-S) deposit in Tongling region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 47-82.
- [14] 唐永成, 吴言昌, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-351.
TANG Yong-cheng, WU Yan-chang, CU Guo-zheng, XING Feng-ming, WANG Yong-min, CAO Feng-yang, CHANG Yin-fo. Copper gold polymetallic ore deposit geology in the region along Yangtze River in Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-351.
- [15] 阎学义, 袁成详. 长江中下游成矿带中石炭世海底火山喷发—沉积黄铁矿型铜矿地质特征[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1977(1): 43-67.
YAN Xue-yi, YUAN Chen-xiang. Geological characteristics of submarine volcanic eruption-sedimentary pyrite type copper deposits in carboniferous in metallogenic belt of the middle and lower Yangtze River[J]. Journal of Nanjing university: Natural Science Edition, 1977(1): 43-67.
- [16] 徐克勤, 朱金初. 我国东南部几个断裂拗陷带中沉积(或火山沉积)热液叠加类型铜矿床成因的探讨[J]. 福建地质, 1978, 4: 1-68.
XU Ke-qin, ZHU Jin-chu. Genesis discussion about sedimentary (or volcanic sedimentary) and reworked by hydrothermal copper deposits in several fault depression belts in Southeast China[J]. Geology of Fujian, 1978, 4: 1-68.
- [17] 顾连兴, 徐克勤. 论长江中下游中石炭世海底块状硫化钨矿床[J]. 地质学报, 1986, 60(2): 176-188.
GU Lian-xin, XU Ke-qin. On the carboniferous submarine massive sulphide deposit in the lower reaches of the Yangzi River[J]. Acta Geologica Sinica, 1986, 60(2): 176-188.
- [18] 岳文浙, 魏乃甄, 焦世鼎. 长江中下游威宁期沉积地质与块状硫化物矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 50-78.
YUE Wen-zhe, WEI Nai-zhen, JIAO Shi-ding. Deposit geology and massive sulfide deposit in Weining period in the middle and lower reaches of Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 50-78.
- [19] GU Lian-xing, HU Wen-xuan, HE Jin-xiang, NI Pei, XU Ke-qin. Regional variations in ore composition and fluid features of massive sulfide deposits in South China: Implications for genetic modeling[J]. Episodes, 2000, 23(2): 110-118.
- [20] XU G, ZHOU J. The Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling mineral district, China: Synorogenic remobilization of a stratiform sulfide deposit[J]. Ore Geology Reviews, 2001, 18(1/2): 77-94.
- [21] 肖新建, 倪培. 论喷流沉积(SEDEX)成矿与沉积—改造成矿之对比[J]. 地质找矿论丛, 2000, 15(3): 238-245.
XIAO Xin-jian, NI Pei. Discussion of comparison of metallogeny for sedex and sedimentary-rework base metal deposit[J]. Geological Prospecting Review, 2000, 15(3): 238-245.
- [22] 徐文艺, 杨竹森, 蒙义峰, 曾普胜, 史大年, 田世洪, 李红阳. 安徽铜陵矿集区块状硫化物矿床成因模型与成矿流体力学迁移[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 353-364.
XU Wen-yi, YANG Zhu-sen, MENG Yi-feng, ZENG Pu-sheng, SHI Da-nian, TIAN Shi-hong, LI Hong-yang. Genetic model and dynamic migration of ore-forming fluids in carboniferous exhalation-sedimentary massive sulfide deposits of Tongling district, Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(3): 353-364.
- [23] 李红阳, 李英杰, 康桂玲, 曹积飞, 杨竹森, 侯增谦, 蒙义峰. 安徽铜官山铜-铁-金-硫矿床的地球化学特征[J]. 地质科学, 2008, 43(2): 370-376.
LI Hong-yang, LI Ying-jie, KANG Gui-ling, CAO Ji-fei, YANG Zhu-sen, HOU Zeng-qian, MENG Yi-feng. Geochemical features of the Tongguanshan Cu-Fe-Au-S deposit in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(2): 370-376.
- [24] 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-379.
CHANG Yin-fo, LIU Xiang-pei, WU Yan-chang. Metallogenic belt of the middle and lower Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-379.
- [25] 常印佛, 刘学圭. 层控式矽卡岩型矿床——以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例[J]. 矿床地质, 1983, 2(1): 11-20.
CHANG Yin-fo, LIU Xue-gui. Layer control type skarn type deposit—some deposits in the middle-lower Yangtze depression in Anhui Province as an example[J]. Mineral Deposits, 1983, 2(1): 11-20.
- [26] 杨兵, 王之田. 铜官山铜矿床新类型矿体的发现及矿床成因模式——兼论其与区域铜矿复合模式的关系[J]. 矿床地质, 1985, 4(4): 1-13.
YANG Bin, WANG Zhi-tian. The new type ore body found and deposit genetic model in Tongguanshan Cu deposit[J]. Mineral Deposits, 1985, 4(4): 1-13.
- [27] 翟裕生, 姚书振, 林新多, 金福全, 周珣若, 万天丰, 周宗桂.

- 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究[J]. 矿床地质, 1992, 11(1): 1-12.
- ZHAI Yu-sheng, YAO Shu-zhen, LIN Xin-duo, JIN Fu-quan, ZHOU Xun-ruo, WAN Tian-feng, ZHOU Zong-gui. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the middle and lower valley of the Yangtze River[J]. Mineral Deposits, 1992, 11(1): 1-12.
- [28] PAN Y, DONE P. The lower Changjiang (Yangtzi/Yangtze River) metallogenic belt, east-center China: intrusion and wall rock hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. Ore Geology Reviews, 1999, 15(4): 177-242.
- [29] BARBARIN B. A review of the relationship between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. Lithos, 1999, 46: 605-626.
- [30] DEPAOLO D J, FARMER G L. Isotopic data bearing on the origin of Mesozoic and Tertiary granitic rocks in the western United States[J]. Phil Trans R Soc London A, 1984, 310: 823-825.
- [31] 董耀松, 范继璋, 杨言臣, 孙德有. 吉林红旗岭铜镍矿床的地质特征及成因[J]. 现代地质, 2004, 18(2): 198-203.
- DONG Yao-song, FAN Ji-zhang, YANG Yan-chen, SUN De-you. Study on the metallogenic feature and ore genesis of Hongqiling copper-nickel deposit, Jilin Province[J]. Geoscience, 2004, 18(2): 198-203.
- [32] DUNGAN M A, LINDSTROM M M, MCMILAND N J, HOEFS J, MOORBATH S, HASKIN L A. Open system magmatic evolution of the Taos Plateau volcanic field, northern New Mexico, 1, The petrology and geochemistry of the Servilletas basalt[J]. Geophys Res, 1986, 91: 5999-6028.
- [33] HOFMANN A W. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism[J]. Nature, 1997, 385: 219-229.
- [34] HOFMANN A W. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: Isotopes and trace elements[C]// HOLLAND H D, TUREKIAN K K. Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2003, 2: 69-97.
- [35] 刘文灿, 高德臻, 储国正. 安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-131.
- LIU Wen-chan, GAO De-zhen, CU Guo-zheng. Tectonic deformation analysis and metallogenic prediction in Tongling region in Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-131.
- [36] 王国光, 倪培. 新桥多金属矿床的矿体下部网脉状矿化的流体包裹体研究[J]. 矿物学报, 2009(S1): 256.
- WANG Guo-guang, NI Pei. Fluid inclusion research on lower net vein mineralization of orebody in Xinqiao polymetallic deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009(S1): 256.
- [37] JOHN F S, JULIE A D, JEANINE M S, LORN E E Y, CAMERON S R. Paleozoic sedimentary rocks in the Red Dog Zn-Pb-Ag district and vicinity, Western Brooks Range, Alaska: Provenance, deposition and metallogenic significance for the genesis of the orebodies[J]. Economic Geology, 2004, 99(7): 1385-1414.
- [38] 毛景文, 张作衡, 王义天. 国外主要矿床类型、特点及找矿勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1-480.
- MAO Jing-wen, ZHANG Zuo-heng, WANG Yi-tian. Foreign main deposit type, characteristics and prospecting exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 1-480.
- [39] MOORE D W, YOUNG L E, MODENE J S, PLAHUTA J T. Geologic setting and genesis of the Red Dog zinc-lead-silver deposit, western Brooks Range, Alaska[J]. Economic Geology, 1986, 81(7): 1696-1727.
- [40] DAVID L L, ERIN M, POUL E, CAMERON S R, KAREN D K, MIKE A. Nature of hydrothermal fluids at the shale-hosted Red Dog Zn-Pb-Ag deposits, Brooks Range, Alaska[J]. Economic Geology, 2004, 9(7): 1449-1480.
- [41] 袁见奇, 朱上庆, 翟裕生. 矿床学[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1-344.
- YUAN Jian-qi, ZHU Shang-qin, ZAI Yu-sheng. Ore deposit geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 1-344.
- [42] 毛景文, 张作衡, 裴荣富. 中国矿床模型概论[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1-560.
- MAO Jing-wen, ZHANG Zuo-heng, PEI Rong-fu. Introduction to Chinese deposit model[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 1-560.
- [43] 张宇. 安徽铜陵新桥铜硫铁矿床地质地球化学特征及矿床成因分析[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- ZHANG Yu. Geochemical characteristics and genesis of Xinqiao Cu-S-Fe deposit, Tongling, Anhui Province[D]. Changsha: Central South University, 2011.

(编辑 李艳红)