

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.01.005

引用格式:周曙光,蔡杨,杜建国,等. 铜陵天马山硫金矿床矽卡岩矿物学特征及矿石硫同位素地球化学研究[J]. 华东地质, 2023, 44(1): 51-66. (ZHOU S G, CAI Y, DU J G, et al. Skarn mineralogical characteristics and ore sulfur isotope geochemistry of Tianmashan sulfur-gold deposit, Tongling area[J]. East China Geology, 2023, 44(1): 51-66.)

铜陵天马山硫金矿床矽卡岩矿物学特征及 矿石硫同位素地球化学研究

周曙光^{1,3}, 蔡 杨^{2,3}, 杜建国^{2,3}, 吴 硕^{1,3}, 施 珂^{2,3}, 李孜腾^{2,3}

(1. 铜陵有色金属集团股份有限公司矿产资源中心, 安徽 铜陵 244000;

2. 安徽省地质调查院(安徽省地质科学研究所), 安徽 合肥 230001;

3. 安徽省深部资源勘查工程研究中心, 安徽 合肥 230001)

摘要: 天马山硫金矿是铜陵矿集区典型的层控热液叠加改造型矿床, 层状矿体中发育大量的矽卡岩矿物。为查明该矿床中矽卡岩矿物的类型及形成环境, 探讨矽卡岩与硫、金成矿之间的关系, 对主要的矽卡岩矿物开展了矿物学及矿物化学研究, 并对矿石进行了硫同位素地球化学研究。研究表明: 矿区内的矽卡岩矿物以石榴子石和辉石为主, 其中石榴子石以钙铁榴石为主, 属于钙铁榴石-钙铝榴石固熔体系列($\text{Gro}_{0\sim 18.73}\text{And}_{80.54\sim 99.00}\text{Spe}+\text{Pyr}+\text{Alm}_{0.54\sim 1.47}$); 辉石以透辉石为主, 其次为钙铁辉石, 属于透辉石-钙铁辉石系列($\text{Di}_{62.35\sim 97.65}\text{Hd}_{1.89\sim 36.27}\text{Jo}_{0.31\sim 1.55}$)。天马山硫金矿的矿物组合(钙铁辉石+透辉石)属于氧化型矽卡岩, 表明矽卡岩形成于相对高温和高氧逸度的条件。石榴子石和辉石端元组分特征及辉石 Mn/Fe 值(0.02~0.07)具有典型的矽卡岩型铜、金矿床特征。矿石硫同位素具有岩浆源的特征, 与区内燕山期岩浆-成矿作用形成的矿石一致, 而明显区别于喷流-沉积作用形成的矿石, 显示成矿作用与燕山期岩浆活动具有密切的成因联系。燕山期中酸性岩浆交代碳酸盐岩围岩形成大量矽卡岩, 矽卡岩矿物的形成增加了岩石的孔隙度和渗透率, 为晚期硫、金矿床的形成提供了有利条件。

关键词: 安徽铜陵矿集区; 天马山硫金矿; 矽卡岩矿物; 硫同位素; 成矿条件

中图分类号: P575.1; P618.51

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2023)01-051-16

长江中下游成矿带是我国东部著名的铜、铁、金多金属成矿带, 包含 200 多个铜-铁-金-钼多金属矿床^[1-5]。铜陵矿集区作为“层控矽卡岩矿床”理论的发祥地^[6], 是长江中下游成矿带重要的矿集区之一。前人对铜陵矿集区矽卡岩型矿床开展了一系列成岩成矿年代学、成矿流体及稳定同位素特征等方面的研究, 对于区内铜、金多金属成矿作用的成矿时空格架、成矿物质来源等有了深入的认识^[7-20]。

天马山硫金矿是铜陵矿集区重要的大型金、硫多金属矿床, 矿床成因类型为层控热液叠加改造型

矿床^[21], 经历了中石炭世海底喷流作用和燕山期岩浆-热液活动的共同作用, 但不同学者对于成矿过程中海底喷流作用和燕山期岩浆活动的贡献还存在明显争议。例如, 俞沧海等^[22-23]通过矿物的生成顺序、交代关系以及与邻区矿床形成环境进行对比, 指出中生代热液叠加改造作用对矿床的形成起主要作用。邵毅等^[24]认为成矿作用与中石炭世海底喷流沉积作用更为密切。

天马山硫金矿床主要的层状矿体中发育大量的矽卡岩, 显示出中生代岩浆热液活动以及矽卡岩

* 收稿日期: 2022-08-25 修订日期: 2022-11-22 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 安徽省自然资源科技项目“安庆—池州—铜陵地区深部成矿背景及深部找矿预测研究(编号: 2020-k-13)”、安徽省重点研究与开发项目“铜陵大型资源基地接替资源勘查研究(编号: 201904a07020077)”和安徽省地质调查院培育计划项目“安徽铜陵狮子山矿田中生代侵入岩岩石包体对深部成矿作用的指示研究(编号: 20KJ-04)”联合资助。

第一作者简介: 周曙光, 1966 年生, 男, 高级工程师, 大学本科, 主要从事矿产地质勘查及研究工作。Email: 932753432@qq.com。

通信作者简介: 蔡杨, 1986 年生, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事矿产地质勘查及研究工作。Email: youngtsai@outlook.com。

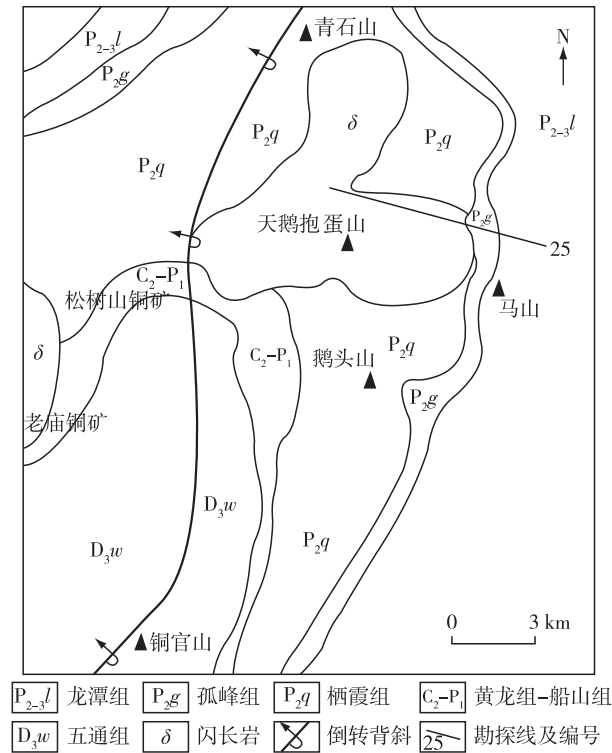


图 2 铜陵市天马山硫金矿床地质简图^[30]

Fig. 2 Geological sketch of Tianmashan sulfur-gold deposit, Tongling City^[30]

2 矿床地质特征

2.1 矿体特征

天马山硫金矿床的矿体产状稳定,形态简单,在空间上可以分为上部层状-似层状矿体和下部网脉状矿体(图 3)。上部似层状矿体长 1 400 m,平均厚约 15 m,主要沿五通组—栖霞组之间的各层间裂隙带发育,均为隐伏矿体。根据矿体的赋存部位及其与地层之间的关系,上部层状-似层状矿体可以分为层状矿体、接触带矿体和穿层矿体 3 类^[23];下部网脉状矿体主要发育在层状-似层状矿体底部泥盆系五通组砂岩中,多为裂隙充填、热液交代和角砾岩矿化形成的脉状-网脉状矿体或浸染状矿体。

矿石成分较复杂,金属矿物和脉石矿物多达 60 余种。主要金属矿物有磁黄铁矿、黄铁矿(图 4),其次有自然金、毒砂、胶状黄铁矿、闪锌矿、磁铁矿、黄铜矿、斑铜矿、方铅矿等。主要的矿石结构有自形-半自形晶结构、他形结构、胶状结构、填隙结构、交代残余结构等。矿石构造主要有块状构造、浸染状-

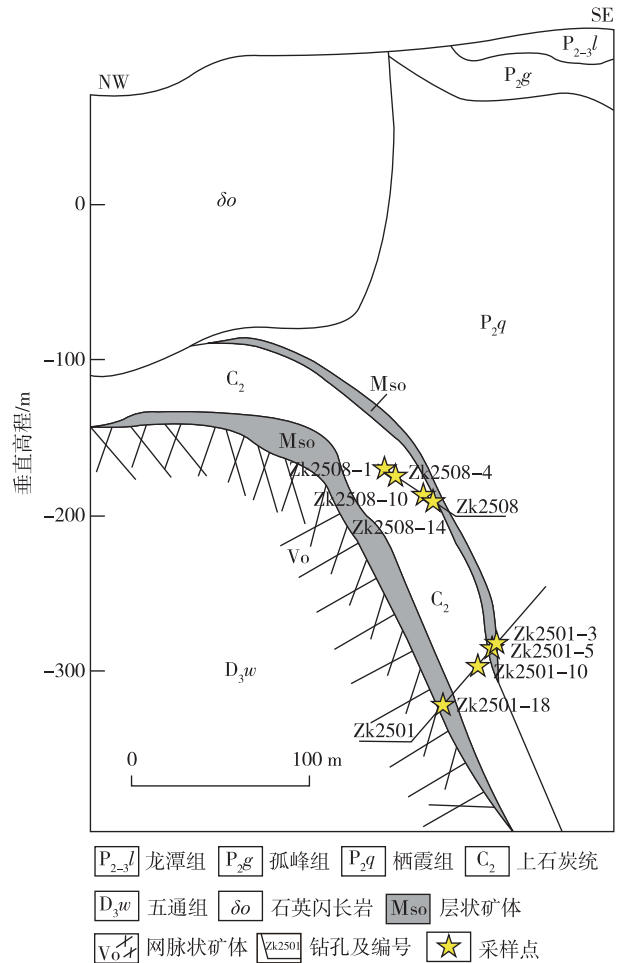


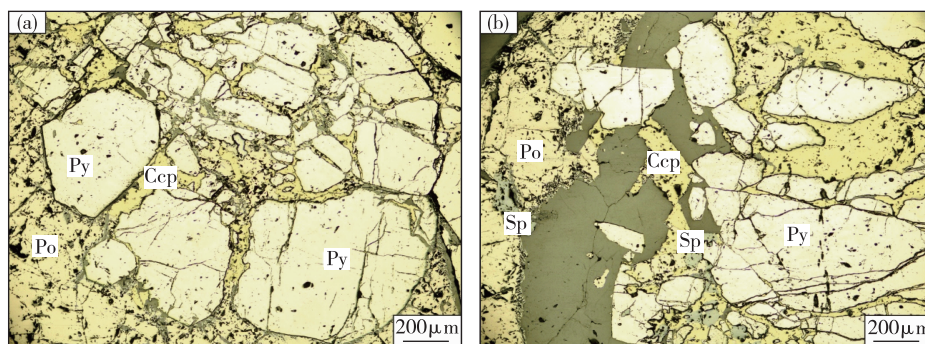
图 3 天马山硫金矿床 25 线地质剖面图^[31]

Fig. 3 Geological section of exploration Line 25 in Tianmashan sulfur-gold deposit^[31]

稠密浸染状构造、条带(纹)状构造、角砾状构造等。金平均品位为 $(4.78 \sim 16.02) \times 10^{-6}$,共生硫平均品位为 17.75%~37.63%。矿床中的金基本以 $>1 \mu\text{m}$ 的独立自然金和金银矿等形式存在,少量以 $<1 \mu\text{m}$ 的细粒分散状存在。

2.2 矿床蚀变及矿物共生关系

矿区蚀变主要以矽卡岩化为主,此外还有黄铁矿化、碳酸盐化、蛇纹石化、硅化、绢云母化、绿泥石化等。矽卡岩化主要发育在岩体与围岩的接触带及其附近,主要的矽卡岩矿物为石榴子石、辉石,少量绿帘石、蛇纹石、滑石、硅镁石等。在空间上,矽卡岩矿化具有一定的分带性,由岩体到围岩依次为石英闪长岩体-矽卡岩化石英闪长岩-矽卡岩-围岩。黄铁矿、磁黄铁矿等金属矿物在空间上与矽卡岩蚀



Py.黄铁矿;Po.磁黄铁矿;Ccp.黄铜矿;Sp.闪锌矿;(a)黄铁矿、磁黄铁矿矿石;(b)黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿矿石

图4 天马山硫金矿床矿石显微照片

Fig. 4 Micrographs of ores in Tianmashan sulfur-gold deposit

变带密切相关,多叠加在石榴子石-辉石矽卡岩中。

根据野外地质调查,结合矿物共生组合、结构及显微岩相学观察,可以将天马山硫金矿床的成矿期划分为喷流沉积期和热液叠加改造期。喷流沉积期主要以形成层纹状、胶状黄铁矿为特征。根据矿物组合关系,热液叠加改造期又可以分为矽卡岩阶段、氧化物阶段、石英-硫化物阶段和碳酸盐阶段。矽卡岩阶段以形成石榴子石、辉石、硅灰石等矽卡岩矿物为主;氧化物阶段的主要矿物为磁铁矿,磁铁矿多分布在石榴子石、辉石等矿物晶间,局部富集为致密块状集合体。此外,还有少量石英、黄铁矿、方解石等矿物;石英-硫化物阶段是主要的成矿阶段,形成了大量的磁黄铁矿、黄铁矿、毒砂等金属硫化物,同时也是主要的金矿化阶段;碳酸盐阶段以大量发育方解石为特征。

3 样品采集与分析方法

本次用于岩相学观察和矿物学分析的样品分别来自天马山硫金矿床 25 线的 ZKS25A01 钻孔、ZKS25A08 钻孔(图 3)以及 ZKB6-2 钻孔。在对钻孔进行详细观察的基础上,采集了相应的矽卡岩样品开展室内显微镜下鉴定工作,并以石榴子石、辉石等为研究对象,通过电子探针分析,测试了矽卡岩矿物的化学组成。此外,还采集了相应的矿石矿物进行矿石硫同位素地球化学分析。

石榴子石、辉石的电子探针分析是在合肥工业大学资源与环境工程学院电子探针(EPMA)分析实验室完成的,仪器型号为 JEOL JXA-8230。实验条件为:加速电压 15 kV,束斑尺寸 3 μm ,探针电流

20 nA。所有元素的信号采集时间均为 15 s,背景时间均为 5 s,使用 ZAF 氧化物进行修正计算,检测限优于 0.01%。

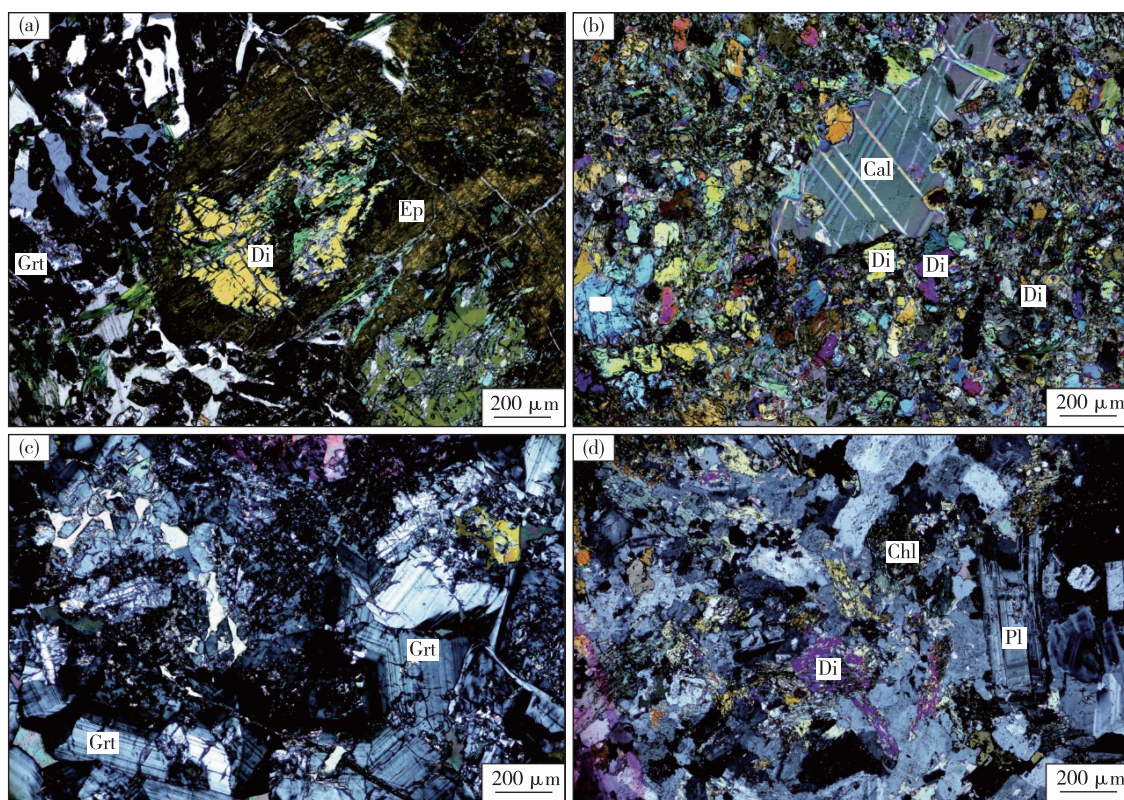
矿石硫同位素地球化学分析是在澳实分析检测(广州)有限公司完成的。实验使用元素分析仪-气体同位素质谱仪测定样品的 $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$,数据经 V-CDT 标准化后获得 $\delta^{34}\text{S}$ 值,相对标准偏差 $<0.03\%$ 。

4 矽卡岩矿物学特征

天马山硫金矿中矽卡岩广泛发育,与成矿作用关系密切。矽卡岩矿物主要为石榴子石、辉石,少量为绿帘石、蛇纹石、滑石、硅镁石等。

4.1 石榴子石

石榴子石是天马山硫金矿床中最主要的矽卡岩矿物。野外手标本中,石榴子石多呈褐色-褐红色,粒径大小不一,小者粒径多为 0.1~0.2 mm,大者粒径可达数 mm。单偏光显微镜下,石榴子石具正极高突起,明显区别于长石等造岩矿物。正交偏光显微镜下,石榴子石可以分为两类:一类石榴子石呈他形粒状,粒径大小不一,全消光,多见与辉石、绿帘石等矿物共生(图 5(a)),构成石榴子石辉石矽卡岩,伴生的金属矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等硫化物;另一类多呈自形-半自形粒状,具有环带状构造,粒径多约为 0.5 mm,共生的其他矽卡岩矿物相对较少(图 5(c)),构成石榴子石矽卡岩。石榴子石晚期均发生明显的交代蚀变,矿物颗粒破碎,伴生绿泥石、褐帘石、绢云母、白云母等矿物,伴生的金属矿物主要为磁铁矿等氧化物。



Grt.石榴子石; Di.透辉石; Ep.绿帘石; Cal.方解石; Chl.绿泥石; Pl.斜长石
(a).石榴子石辉石矽卡岩;(b).辉石矽卡岩;(c).石榴子石矽卡岩;(d).辉石化石英闪长岩

图 5 天马山硫金矿床矽卡岩显微镜下照片

Fig. 5 Micrographs of skarn in Tianmashan sulfur-gold deposit

4.2 辉石

辉石主要发育在石榴子石辉石矽卡岩(图 5(a))、辉石矽卡岩(图 5(b))以及辉石化石英闪长岩(图 5(d))中。手标本中,辉石多呈浅绿色、绿色短柱状或粒状晶体。显微镜下观察,辉石多呈半自形-他形粒状,粒径多为 0.1~0.5 mm。辉石类矿物以透辉石为主,单偏光显微镜下为正高突起,正交偏光镜下具二级蓝绿-橙黄干涉色。透辉石多数与石榴子石共生形成石榴子石透辉石矽卡岩,后期交代明显,常见与绿帘石、绿泥石等矿物共生,伴生金属矿物以黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿等硫化物为主。

5 分析结果

5.1 石榴子石

本文分析了天马山硫金矿床 ZKS25A01 钻孔和 ZKS25A08 钻孔矽卡岩的石榴子石化学组成,共完成了 10 个点位的分析,测试结果见表 1。两类石

榴子石的地球化学组成无明显差异,主要由 SiO_2 、 CaO 、 TFeO 组成,含少量的 Al_2O_3 ,其中 SiO_2 含量为 34.84%~36.09%,平均值为 35.42%; CaO 含量为 32.08%~34.03%,平均值为 33.26%; TFeO 含量为 23.20%~29.18%,平均值为 26.94%; Al_2O_3 含量为 0%~3.83%,平均值为 1.22%。此外, TiO_2 、 Cr_2O_3 、 MnO 和 MgO 的含量相对较低,分别为 0%~0.56%、0%~0.03%、0.01%~0.28%和 0.01%~0.23%。石榴子石的端元组分以钙铁榴石为主($\text{And}=80.54\%\sim99.00\%$),其次为钙铝榴石($\text{Gro}=0\%\sim18.73\%$),少量锰铝榴石($\text{Spe}=0.02\%\sim0.66\%$)、镁铝榴石($\text{Pyr}=0.03\%\sim0.94\%$)和铁铝榴石($\text{Alm}=0\%\sim0.85\%$),属于钙铁榴石-钙铝榴石固熔体系列($\text{Gro}_{0\sim18.73}\text{And}_{80.54\sim99.00}\text{Spe}+\text{Pyr}+\text{Alm}_{0.54\sim1.47}$)。石榴子石的 TFeO 和 Al_2O_3 含量呈负相关(图 6(a)),随着 Fe 含量的增加,Al 含量具有明显降低的趋势, SiO_2 和 CaO 含量则呈弱的正相关(图 6(b)),反映了钙铁榴

石-钙铝榴石固溶体系列成分的变化特征,推断其形成于非平衡条件下^[32]。

表 1 天马山硫金矿床石榴子石电子探针分析结果
Table 1 EPMA analysis data of garnets in Tianmashan sulfur-gold deposit

样品编号	Zk2501					Zk2508				
	10-1	10-2	10-3	10-4	10-5	14-1	14-2	14-3	14-4	14-5
分析结果/%										
SiO ₂	36.09	35.22	35.77	35.40	35.90	35.00	35.52	34.84	35.19	35.28
TiO ₂	0.34	0.56	0	0.00	0.11	0	0	0	0.04	0.01
Al ₂ O ₃	3.83	1.87	1.74	0.42	2.52	0.01	0.40	0	0	1.38
Cr ₂ O ₃	0	0.03	0	0.00	0.03	0.02	0	0	0.03	0.00
FeO	23.20	25.54	26.50	27.99	25.23	28.80	27.94	29.08	29.18	25.93
MnO	0.18	0.13	0.14	0.14	0.12	0.28	0.23	0.15	0.24	0.01
MgO	0.08	0.07	0.05	0.08	0.07	0.06	0.16	0.07	0.01	0.23
CaO	34.01	33.25	33.51	32.93	34.01	33.11	33.25	32.08	32.39	34.03
计算结果 基于 12 个氧原子计算										
Si	2.98	2.96	2.98	2.99	2.97	2.95	2.98	2.97	2.98	2.96
Ti	0.02	0.04	0	0	0.01	0	0	0	0	0
Al	0.37	0.19	0.17	0.04	0.25	0	0.04	0	0	0.14
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ³⁺	1.60	1.80	1.85	1.97	1.75	2.03	1.96	2.05	2.04	1.82
Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.03	0
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0
Mg	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0	0.03
Ca	3.01	3.00	2.99	2.98	3.01	2.99	2.99	2.93	2.94	3.06
端元组分/%										
And	80.55	90.11	91.02	97.25	87.16	99.06	96.86	98.66	98.53	92.13
Gro	18.73	9.29	8.44	2.07	12.28	0.02	1.95	0	0	6.92
Alm	0	0	0	0	0	0	0	0.71	0.86	0
Pyr	0.30	0.29	0.21	0.35	0.28	0.25	0.66	0.28	0.03	0.94
Spe	0.42	0.31	0.33	0.33	0.28	0.66	0.54	0.35	0.58	0.02

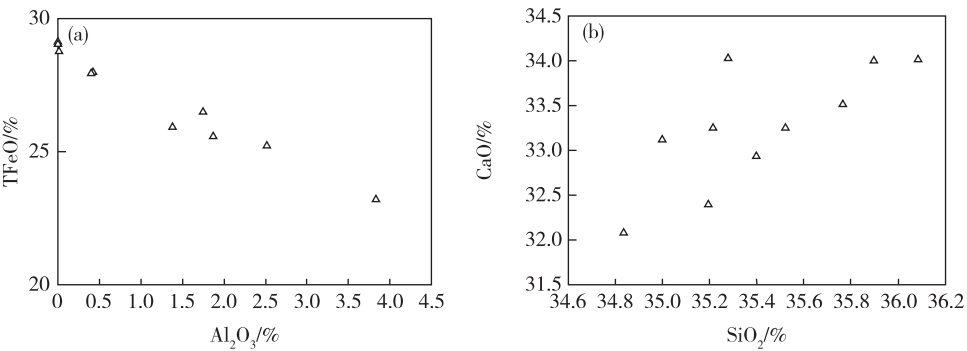


图 6 天马山硫金矿石榴子石 Al₂O₃-TFeO 图解(a)和 SiO₂-CaO 图解(b)
Fig. 6 Al₂O₃-TFeO diagram (a) and SiO₂-CaO diagram (b) of garnet in Tianmashan sulfur-gold deposit

5.2 辉石

对天马山矿床 ZKS25A01 钻孔、ZKS25A08 钻

孔和 ZKB6-2 钻孔中矽卡岩中的辉石进行了电子探针分析,共完成 25 个点位的分析,测试结果见表 2。

天马山矿床辉石主要由 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 TFeO 等组成,以透辉石和钙铁辉石为主。 SiO_2 含量为 51.01%~54.55%,平均值为 52.85%, CaO 含量为 23.17%~25.88%,平均值为 24.79%,但 MgO 、 TFeO 含量变化较大, MgO 含量为 10.47%~

16.56%, TFeO 含量为 2.95%~12.28%。此外,辉石还具有相对较低的 TiO_2 (0%~0.07%)、 Al_2O_3 (0.15%~3.62%)、 MnO (0.10%~0.48%)、 Na_2O (0%~0.43%) 含量。

表 2 铜陵地区天马山硫金矿辉石电子探针分析结果

Table 2 EPMA analysis data of pyroxene in Tianmashan sulfur-gold deposit

样品编号	Zk2508					Zk2501					Zk0602		
	14-1	14-2	14-3	14-4	14-5	10-1	10-2	10-3	10-4	10-5	3-1	3-2	3-3
分析结果/%													
SiO_2	52.27	53.04	53.54	53.98	54.55	52.86	51.01	52.66	54.04	53.68	51.98	53.18	52.70
TiO_2	0.05	0.03	0.07	0	0.03	0.01	0.01	0	0	0.04	0.01	0.03	0.02
Al_2O_3	1.64	0.94	0.64	0.20	0.48	1.94	3.62	2.12	0.53	0.23	0.75	0.15	0.34
Cr_2O_3	0.04	0.04	0.03	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0.01	0.03
FeO	4.98	5.04	4.76	5.20	3.31	2.95	4.32	3.93	5.75	7.59	10.66	10.07	10.19
MnO	0.26	0.10	0.19	0.23	0.24	0.14	0.13	0.12	0.21	0.31	0.41	0.43	0.37
MgO	15.41	15.42	15.91	15.34	16.56	16.51	15.08	15.95	15.01	13.42	11.71	12.04	12.16
CaO	25.53	25.52	25.79	25.55	25.71	25.70	25.86	25.86	25.88	25.43	24.35	24.59	24.60
Na_2O	0.03	0.04	0.04	0.00	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0	0.17	0.15	0.19
计算结果	以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准												
Si	1.92	1.95	1.95	1.98	1.98	1.92	1.87	1.91	1.97	1.99	1.96	1.99	1.97
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	0.07	0.04	0.03	0.01	0.02	0.08	0.16	0.09	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe^{3+}	0.09	0.06	0.08	0.03	0.03	0.07	0.11	0.08	0.04	0.01	0.06	0.02	0.05
Fe^{2+}	0.06	0.09	0.07	0.13	0.07	0.02	0.02	0.04	0.13	0.23	0.28	0.30	0.27
Mn	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.84	0.84	0.86	0.84	0.89	0.90	0.82	0.86	0.82	0.74	0.66	0.67	0.68
Ca	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01	0.98	0.99	0.99
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01
端元组分/%													
Jo	0.90	0.31	0.62	0.73	0.75	0.46	0.46	0.42	0.67	0.99	1.36	1.39	1.23
Di	92.42	89.92	91.94	85.93	91.60	97.65	96.67	95.52	85.50	75.60	69.20	68.27	70.75
Hd	6.68	9.76	7.44	13.34	7.65	1.89	2.88	4.07	13.83	23.41	29.43	30.35	28.03
Zk0602													
样品编号	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10	3-11	3-12	3-13	3-14	3-15	
	分析结果/%												
SiO_2	52.54	52.59	52.03	53.45	53.01	52.56	52.74	52.73	53.00	52.34	52.21	52.61	
TiO_2	0	0.05	0.03	0.02	0	0.04	0.03	0	0.06	0.01	0.02	0	
Al_2O_3	0.43	0.78	0.70	0.37	0.92	0.43	0.35	0.33	0.71	0.54	0.71	0.38	
Cr_2O_3	0	0	0	0	0.08	0.07	0.07	0.01	0.01	0.04	0.06	0.06	
FeO	11.46	10.20	12.28	7.47	8.31	10.21	10.33	10.98	9.35	10.24	11.26	11.00	

续表

MnO	0.48	0.32	0.41	0.26	0.21	0.47	0.38	0.33	0.34	0.39	0.20	0.30
MgO	11.62	12.01	10.47	14.11	13.34	12.09	11.44	11.34	12.78	12.01	11.35	11.40
CaO	23.17	24.58	23.95	24.07	24.01	24.11	24.77	24.41	24.29	23.84	23.80	24.45
Na ₂ O	0.25	0.27	0.35	0.26	0.43	0.32	0.14	0.14	0.28	0.30	0.27	0.08
以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准												
Si	1.99	1.96	1.97	1.99	1.97	1.97	1.99	1.99	1.97	1.98	1.98	1.99
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ³⁺	0.02	0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.01	0.01	0.05	0.04	0.03	0.01
Fe ²⁺	0.34	0.26	0.34	0.20	0.21	0.27	0.31	0.33	0.24	0.28	0.32	0.33
Mn	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.66	0.67	0.59	0.78	0.74	0.68	0.64	0.64	0.71	0.68	0.64	0.64
Ca	0.94	0.98	0.97	0.96	0.95	0.97	1.00	0.99	0.97	0.96	0.97	0.99
Na	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
端元组分/%												
Jo	1.51	1.07	1.38	0.81	0.71	1.55	1.25	1.06	1.11	1.30	0.64	0.97
Di	64.80	70.95	62.35	78.87	77.65	70.56	66.35	64.94	73.50	69.79	65.94	65.14
Hd	33.69	27.98	36.27	20.32	21.64	27.90	32.40	34.00	25.39	28.91	33.41	33.89

辉石端元组分以透辉石为主($\text{Di} = 62.35\% \sim 97.65\%$), 其次为钙铁辉石($\text{Hd} = 1.89\% \sim 36.27\%$), 属于透辉石-钙铁辉石系列($\text{Di}_{62.35 \sim 97.65}$

$\text{Hd}_{1.89 \sim 36.27} \text{Jo}_{0.31 \sim 1.55}$)。TFeO 含量与 MgO、CaO 含量呈明显的负相关(图 7(a)、图 7(b)), SiO_2 含量与 MgO、CaO 含量无明显的相关性(图 7(c)、图 7(d))。

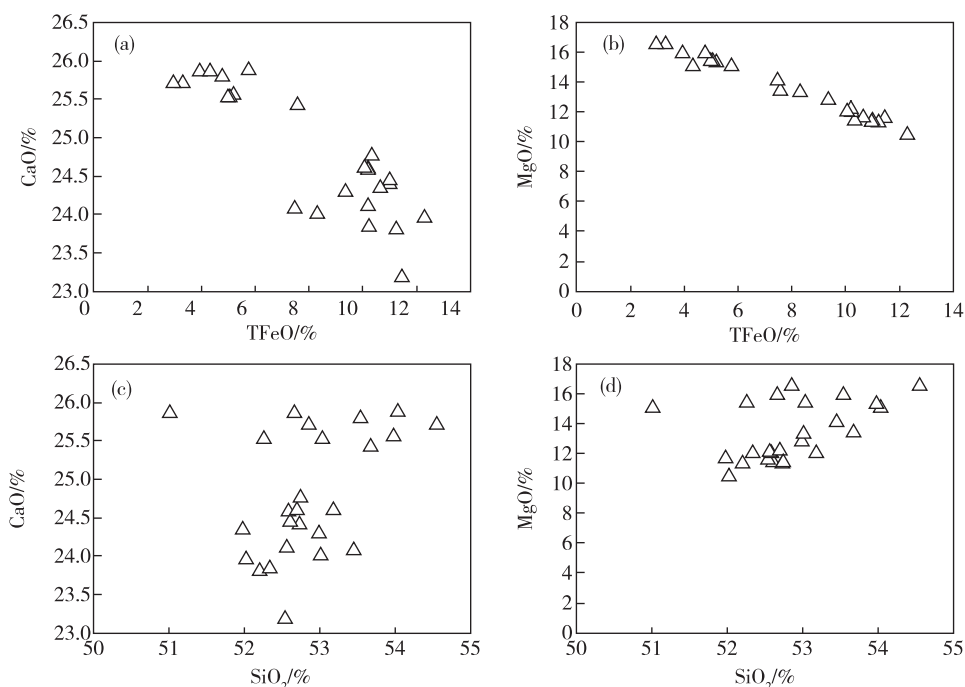


图 7 天马山硫金矿辉石 TFeO-CaO 图解(a)、TFeO-MgO 图解(b)、 SiO_2 -CaO 图解(c)和 SiO_2 -MgO 图解(d)

Fig. 7 TFeO-CaO diagram (a), TFeO-MgO diagram (b), SiO_2 -CaO diagram (c) and SiO_2 -MgO diagram (d) of pyroxene in Tianmashan sulfur-gold deposit

5.3 硫同位素

天马山硫金矿床硫化物矿石的硫同位素分析结果见表 3。除磁黄铁矿样品具有相对较低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (1.93‰) 外,其他硫化物矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为

6.41‰~10.92‰,平均值为 8.88‰,与铜陵地区矽卡岩型铜多金属矿床的金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值相近,而略高于前人在天马山获得的硫化物硫同位素组成。

表 3 天马山硫金矿硫化物硫同位素组成

Table 3 Sulfur isotopic composition of sulfides in Tianmashan sulfur-gold deposit

序号	样品编号	样品名称	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	数据来源	序号	样品编号	样品名称	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	数据来源
1	ZKS25A01-18	磁黄铁矿+黄铁矿	10.92	本文	11	—	黄铁矿	3.4~9.8(6.11)	[21]
2	ZKS25A08-10	磁黄铁矿	9.03		12	—	胶黄铁矿	4~8.5(5.88)	[21]
3	ZKS25A01-19	黄铁矿	8.79		13	—	方铅矿	5.7~8.1(6.87)	[21]
4	ZKS25A01-05	磁黄铁矿	1.93		14	—	闪锌矿	2.6~9.9(6.70)	[21]
5	ZKS25A01-7	黄铁矿	6.41		15	—	I 号矿体	-0.7~10.4(6.31)	[21]
6	ZKS25A08-4	磁黄铁矿	8.37		16	—	II 号矿体	-6.1~7.9(5.52)	[21]
7	ZKS25A01-3	磁黄铁矿	9.91		17	—	III 号矿体	3.4~8.0(5.55)	[21]
8	ZKS25A08-1	磁黄铁矿	8.43		18	—	闪长岩体	3.41~8.7(5.11)	[21]
9	ZKB6-5-5	黄铁矿	9.15		19	—	胶黄铁矿	5.4~7.6(6.37)	[31]
10	—	磁黄铁矿	-0.7~8.2(5.82)		20	—	黄铁矿	6.3~8.0(7.18)	[31]

注:括号内数值表示平均值。

6 讨论

6.1 成矿物理化学条件

矽卡岩矿物组成与侵入岩成分、围岩组分、深度、氧逸度、温度和压力等条件密切相关^[33-36]。通过矽卡岩矿床主要矽卡岩矿物成分、共生组合等方面的综合研究,可以反演矿床成岩成矿过程中物理化学条件的变化^[29],不同氧化还原环境将形成特定的矽卡岩矿物。因此,矽卡岩中不同矿物的种属、组分、分布及不同端元组分常用来判定形成环境的氧化还原状态^[28, 37-40]。石榴子石矿物成分的变化,对于示踪矽卡岩的形成环境具有重要的指示意义^[41-42]。

天马山硫金矿床的石榴子石端元组成为 $\text{GrO}_{0\sim 18.73}\text{And}_{80.54\sim 99.00}\text{Spe}+\text{Pyr}+\text{Alm}_{0.54\sim 1.47}$,以钙铁榴石为主,辉石端元组分为 $\text{Di}_{62.35\sim 97.65}\text{Hd}_{1.89\sim 36.27}\text{Jo}_{0.31\sim 1.55}$,以透辉石为主,属于氧化型矽卡岩^[43-44]。矽卡岩矿物的类型及 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 值是成岩时氧化-还原环境的指示剂^[45-46]。天马山硫金矿石榴子石具有较低的 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 值 (0~0.01),铁主要以 Fe^{3+} 的形式存在,形成的矽卡岩矿物具有以钙铁榴石、透辉石为主的特征,表明岩石形成于较氧化的条件下^[47-49]。矽卡岩中以透辉石为主的特征,表明

其形成于高温、高氧逸度的条件下^[50]。前人对钙铁榴石-钙铝榴石形成的物理化学条件进行实验研究,发现钙铁榴石的形成温度主要为 450~600℃,处于 pH 值为 4.0~11.0 的氧化-弱氧化的环境^[51-52]。由此可知,天马山矿床早期矽卡岩阶段的成矿流体具有高温、高氧逸度的特征。

6.2 成矿物质来源

天马山硫金矿成矿过程经历了石炭纪喷流沉积期和白垩纪岩浆热液期的共同作用^[21-23],矿石矿物主要为磁黄铁矿、黄铁矿等硫化物。硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 1.93‰~10.92‰,主要集中在 6.41‰~10.92‰,与岩体的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (5.1‰~9.6‰) 相近^[31, 53],表明矿石中的硫可能主要来源于岩浆。铜陵地区与喷流沉积作用有关的黄铁矿具有相对较低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (-15.42‰~-9.47‰)^[54-55],表明沉积过程中可能有生物参与了成矿作用。天马山硫金矿中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显区别于区内与沉积有关的矿石,而与区内矽卡岩型矿石的硫同位素组成相近(图 8),表明矿石中的硫源与中生代的岩浆活动密切相关,燕山期的岩浆-成矿阶段是天马山硫金矿的主成矿阶段。此外,季克俭^[56]通过分析天马山硫金矿中不同类型岩浆岩的 Au 含量,指出在岩浆演化过程中,岩浆房共有 54.4 t 的金转入岩浆热液

中,为矿床提供了足够的金。区域岩浆岩及地层中金的丰度也表明金主要来源于岩浆热液^[22]。由此

可知,金、硫等成矿物质均主要源自于燕山期的岩浆活动。

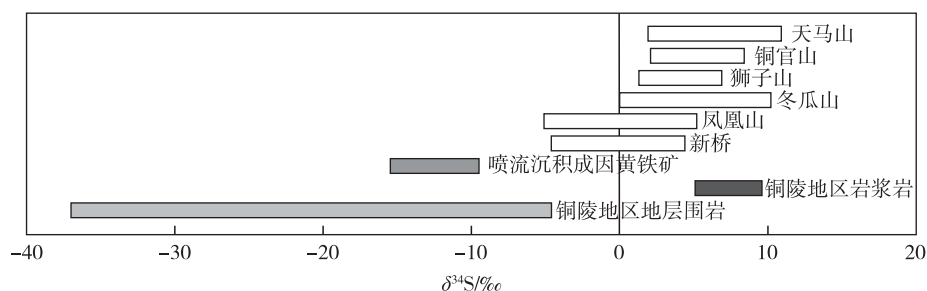


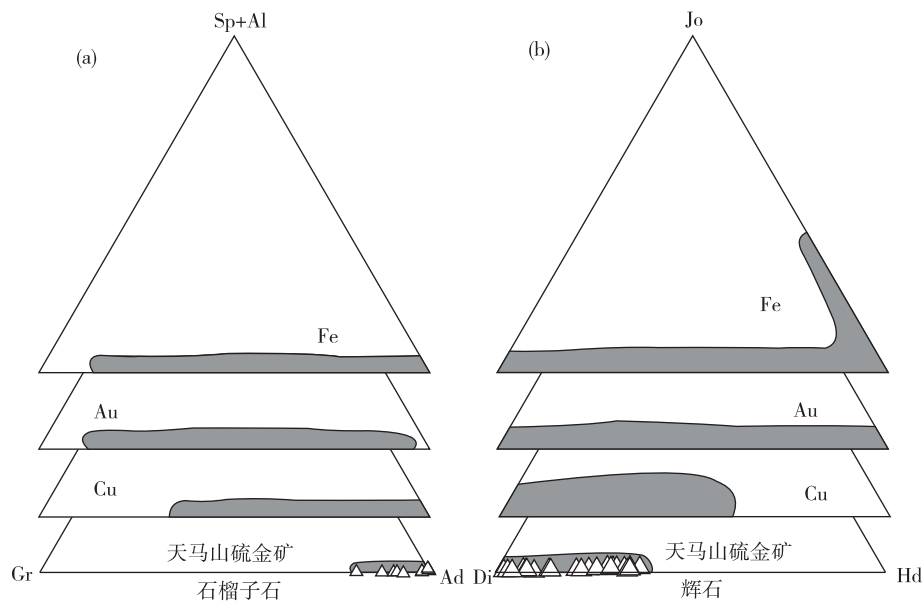
图8 铜陵地区主要矿床的矿石硫同位素组成

Fig. 8 The S isotopic composition of major deposits in Tongling area

6.3 矽卡岩与成矿关系

天马山硫金矿主矿体中广泛发育的矽卡岩与成矿作用关系密切。在矽卡岩型多金属矿床中,石榴子石、辉石类矽卡岩矿物可以指示矽卡岩的成岩成矿过程,并作为指示矿化种属的直接标志^[57-59]。研究表明,与Fe、Cu、Au有关的矽卡岩中,石榴子石均为钙铁榴石-钙铝榴石固熔体系列,明显区别于与W、Sn

有关的矽卡岩^[60]。艾永富等^[61]认为,与Fe矿化有关的石榴子石成分近于钙铁榴石,与Fe-Cu多金属矿化相关的石榴子石为钙铁榴石-钙铝榴石的过渡成分。天马山硫金矿床的石榴子石主要为钙铁榴石-钙铝榴石系列,且以钙铁榴石为主,钙铁榴石的分子含量为80.54%~99.00%,与世界上主要的矽卡岩型金矿、铜金矿床的石榴子石端元组分相近(图9(a))。



Sp. 锰铝榴石; Al. 铁铝榴石; Gr. 钙铝榴石; Ad. 钙铁榴石; Jo. 钙锰辉石; Di. 透辉石; Hd. 钙铁辉石

图9 天马山硫金矿石榴子石(a)、辉石(b)端元组分三角图解^[57]

Fig. 9 Triangular diagrams of garnet (a) and pyroxenes (b) in Tianmashan sulfur-gold deposit^[57]

研究表明,辉石Mn/Fe值、Mg/Fe值变化可以指示矽卡岩金属矿化的类型^[62]。赵一鸣等^[63]认为,矽卡岩型铁矿、金矿以及部分铜矿中的辉石具

有Mn/Fe值<0.1的特征,矽卡岩型铅锌矿的锰钙铁辉石具有Mn/Fe值>0.1、Mg/Fe值<1的特征。天马山硫金矿床的辉石Mn/Fe值为0.02~0.07,

平均值为0.04,明显<0.1,与矽卡岩型铁、金、铜矿床特征相近。辉石以透辉石为主,属于钙铁辉石-透辉石序列,在辉石的端元组分三角图解中,与世界上主要的矽卡岩型金矿、铜矿床的辉石端元组分相近(图9(b))。

天马山硫金矿矿石的硫同位素组成表明其成矿作用与中生代岩浆活动密切相关,成矿物质主要来源于燕山期岩浆活动。在岩浆演化晚期,高氧逸度的岩浆热液携带大量Au、Cu、S等成矿元素和挥发份,与围岩发生交代形成大量矽卡岩。矽卡岩阶段,石榴子石的大量发育使围岩密度增加,进而减少了碳酸盐岩围岩的体积,扩大了围岩矿物颗粒间的孔隙度。氧化物阶段,随着岩体与碳酸盐岩接触交代作用的进行及矽卡岩矿物的生成,成矿热液中大量的 Fe_2O_3 转变形成磁铁矿^[52],并在矽卡岩矿物的晶间沉淀,局部富集成致密块状集合体。围岩孔隙度和渗透率的增加,进一步促进了热液与围岩的充分反应,为硫化物沉淀提供了空间^[64-65]。在石英-硫化物阶段,随着成矿温度以及流体氧逸度的降低,形成了大量的磁黄铁矿、黄铁矿、毒砂等硫化物。伴随着硫化物的沉淀,大量的金与硫化物共同富集,最终形成了硫金矿床。

7 结论

(1)天马山硫金矿床的矽卡岩矿物主要为石榴子石和辉石。石榴子石以钙铁榴石为主,其次为钙铝榴石,属于钙铁榴石-钙铝榴石固熔体系列;辉石以透辉石为主,其次为钙铁辉石,属于透辉石-钙铁辉石系列。

(2)天马山硫金矿床矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值为6.41‰~10.92‰,与岩体的硫同位素组成相近,表明成矿物质主要来自于燕山期的岩浆活动。

(3)天马山硫金矿床的钙铁榴石+透辉石矿物组合属于氧化型矽卡岩,石榴子石和辉石端元组分特征以及辉石较低的Mn/Fe值,均表明矿床形成于相对高温、高氧逸度的条件下。岩浆活动期后的矽卡岩阶段增加了围岩的孔隙度和渗透率,有利于硫金矿床的形成。

致谢:《华东地质》的两名审稿专家对本文进行了认真、专业的审阅,并提出了具有启发性和指导意义的意见与建议,极大地提高了本文的学术质

量,谨致衷心感谢!

参考文献

- [1] 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,1991:1-359.
CHANG Y F, LIU X P, WU Y C. The copper-iron belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-359.
- [2] 翟裕生,姚书振,林新多,等.长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M].北京:地质出版社,1992:12-35.
ZHAI Y S, YAO S Z, LIN X D, et al. Metallogenic regularity of iron, copper and gold in the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 12-35.
- [3] 周涛发,范裕,袁峰.长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J].岩石学报,2008,24(8):1665-1678.
ZHOU T F, FAN Y, YUAN F. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1665-1678.
- [4] 鲁杏,张玲玲,崔先文,等.安徽淮北前常东铜铁矿区三维电性结构特征[J].华东地质,2022,43(3):268-275.
LU X, ZHANG L L, CUI X W, et al. 3D electrical structure of the Qianchang East copper iron mining area, Anhui Province[J]. East China Geology, 2022, 43(3): 268-275.
- [5] 谢金金,陶春军,余有林.歙县鲍坑地区金矿成矿地质条件及找矿远景分析[J].华东地质,2022,43(2):196-204.
XIE J J, TAO C J, YU Y L. Metallogenic conditions and ore-prospecting of gold deposit in Baokeng area, Shexian County[J]. East China Geology, 2022, 43(2): 196-204.
- [6] 常印佛,刘学圭.关于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(1):11-20.
CHANG Y F, LIU X G. On strata-bound skarn deposits[J]. Mineral Deposits, 1983(1): 11-20.
- [7] 吴才来,周珣若,黄许陈,等.铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究[J].岩石矿物学杂志,1996,15(4):299-306.
WU C L, ZHOU X R, HUANG X C, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology of intrusive rocks from Tongling[J]. Acta

- Petrologica et Mineralogica, 1996, 15(4): 299-306.
- [8] 吴才来, 高前明, 国和平, 等. 铜陵酸性侵入岩成因及锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2630-2652.
- WU C L, GAO Q M, GUO H P, et al. Petrogenesis of the intermediate-acid intrusive rocks and zircon SHRIMP dating in Tongling Anhui China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2630-2652.
- [9] 赵斌, 赵劲松. 长江中下游地区若干铁铜(金)矿床中块状及脉状钙质夕卡岩的氧、锶同位素地球化学研究[J]. 地球化学, 1997, 26(5): 34-53.
- ZHAO B, ZHAO J S. O and Sr isotopic geochemistry for massive and vein calcareous skarns from some iron-copper (gold) deposits along the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River[J]. Geochimica, 1997, 26(5): 34-53.
- [10] 周涛发, 岳书仓, 袁峰, 等. 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[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(S1): 122-128.
- ZHOU T F, YUE S C, YUAN F, et al. Two series of copper-gold deposits in the middle and lower reaches of the Yangtze River area (MLYRA) and the hydrogen, oxygen, sulfur and lead isotopes of their ore-forming hydrothermal systems[J]. Science in China (Series D), 2000, 30(S1): 122-128.
- [11] 周涛发, 范裕, 王世伟, 等. 长江中下游成矿带成矿规律和成矿模式[J]. 岩石学报, 2017, 33(11): 3353-3372.
- ZHOU T F, FAN Y, WANG S W, et al. Metallogenic regularity and metallogenic model of the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(11): 3353-3372.
- [12] 蒙义峰, 杨竹森, 曾普胜, 等. 铜陵矿集区成矿流体系统时限的初步厘定[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 271-280.
- MENG Y F, YANG Z S, ZENG P S, et al. [J]. Tentative temporal constraints of ore-forming fluid systems in Tongling Metallogenic Province [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(3): 271-280.
- [13] 吴淦国, 张达, 狄永军, 等. 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), 2008, 38(5): 630-645.
- WU G G, ZHANG D, DI Y J, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of the intrusives in the Tongling metallogenic cluster and its dynamic setting[J]. Science in China (Series D), 2008, 38(5): 630-645.
- [14] 谢建成, 杨晓勇, 杜建国, 等. 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, 2008, 24(8): 1782-1800.
- XIE J C, YANG X Y, DU J G, et al. Zircon U-Pb geochronology of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling region: Implications for copper-gold mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1782-1800.
- [15] 谢建成, 杨晓勇, 肖益林, 等. 铜陵矿集区中生代侵入岩成因及成矿意义[J]. 地质学报, 2012, 86(3): 423-459.
- XIE J C, YANG X Y, XIAO Y L, et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks from the Tongling ore cluster region: the metallogenic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(3): 423-459.
- [16] 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 等. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. 矿床地质, 2009, 28(2): 109-119.
- MAO J W, SHAO Y J, XIE G Q, et al. Mineral deposit model for porphyry-skarn polymetallic copper deposits in Tongling ore dense district of Middle-Lower Yangtze Valley metallogenic belt [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(2): 109-119.
- [17] 徐晓春, 楼金伟, 梁建峰, 等. 安徽铜陵矿集区矿床勘查与地质研究新进展[J]. 安徽地质, 2011, 21(2): 119-130.
- XU X C, LOU J W, LIANG J F, et al. Latest progress in ore deposit exploration and geological research in the Tongling ore concentration area, Anhui [J]. Geology of Anhui, 2011, 21(2): 119-130.
- [18] 徐晓春, 左续, 何俊, 等. 安徽铜陵地区晚中生代早、晚两期侵入岩的地质和地球化学特征[J]. 高校地质学报, 2018, 24(3): 325-339.
- XU X C, ZUO X, HE J, et al. Geological and geochemical characteristics of the intrusive rocks of early and late stage during Late Mesozoic in Tongling District, Anhui Province[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(3): 325-339.
- [19] 王次松, 吴才来, 郑坤, 等. 铜陵凤凰山矿田成矿时代及成矿物质来源[J]. 矿床地质, 2018, 37(6): 1195-1216.
- WANG C S, WU C L, ZHENG K, et al. Ore-forming ages and sources of metallogenic materials of Fenghuangshan ore field in Tongling[J]. Mineral Deposits, 2018, 37(6): 1195-1216.
- [20] 施珂, 杜建国, 万秋, 等. 安徽铜陵矿集区中生代侵入岩体年代学研究及其成矿指示意义[J]. 地质学报,

- 2019, 93(5): 1096-1112.
- SHI K, DU J G, WAN Q, et al. Chronology study of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling ore-cluster region, Anhui, and its metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(5): 1096-1112.
- [21] 夏元法. 试论天马山硫金矿床的成矿物质来源[J]. *矿床与地质*, 1999, 13(1): 34-38.
- XIA Y F. A tentative study on the origin of ore-forming materials of Tianmashan sulfur-gold deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1999, 13(1): 34-38.
- [22] 俞沧海. 安徽铜陵天马山硫金矿床物质来源探讨[J]. *黄金地质*, 2000, 6(1): 44-48.
- YU C H. Study on the origin of materials of Tianmashan sulfur-gold deposit in Tongling, Anhui[J]. *Gold Geology*, 2000, 6(1): 44-48.
- [23] 俞沧海, 袁小明. 铜陵天马山硫金矿床地质特征及成因探讨[J]. *矿产与地质*, 2002, 16(2): 74-77.
- YU C H, YUAN X M. Geological features and study on genesis of Tianmashan sulfur-gold deposit[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2002, 16(2): 74-77.
- [24] 邵毅, 张遵忠, 吴昌志, 等. 安徽铜陵马山层控金铜硫矿床成因[J]. *地质找矿论丛*, 2010, 25(4): 310-318, 335.
- SHAO Y, ZHANG Z Z, WU C Z, et al. Genesis of the Mashan Au-Cu-S deposit, Tongling, Anhui Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2010, 25(4): 310-318, 335.
- [25] EINAUDI M T, MEINERT L D, NEWBERRY R J. Skarn deposits[J]. *Economic Geology*, 1981: 317-391.
- [26] EINAUDI M T, BURTON D M. Introduction, terminology, classification, and composition of skarn deposits [J]. *Economic Geology*, 1982, 77(4): 745-754.
- [27] SMITH M P, HENDERSON P, JEFFRIES T, et al. The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich Aureole, Skye, Scotland, UK; Constraints on processes in a dynamic hydrothermal system [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(3): 457-484.
- [28] SOMARIN A K. Garnet composition as an indicator of Cu mineralization: evidence from skarn deposits of NW Iran [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, 81(1): 47-57.
- [29] MEINERT L, DIPPLE G, NICOLESCU S. World skarn deposits[C]//*Economic Geology: 100th Anniversary Volume*. El Paso: Economic Geology Publishing Co., 2005: 299-336.
- [30] 华东冶金地质勘查局 812 地质队. 安徽省铜陵市马山金(硫)矿床普查-详查地质报告[R]. 铜陵: 华东冶金地质勘查局 812 地质队, 1992.
- No. 812 Geological Team, East China Metallurgical Bureau of Geological and Exploration. The survey-detailed geological report of Mashan gold (sulfur) deposit in Tongling, Anhui Province[R]. Tongling: No. 812 Geological Team, East China Metallurgical Bureau of Geological and Exploration, 1992.
- [31] 杨秋荣, 王金芳, 冯景志, 等. 安徽铜陵天马山金硫矿床地质地球化学特征[J]. *地球学报*, 2010, 31(2): 203-208.
- YANG Q R, WANG J F, FENG J Z, et al. Geological and geochemical characteristics of the Tianmashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(2): 203-208.
- [32] 赵劲松, NEWBERRY R J. 对柿竹园矽卡岩成因及其成矿作用的新认识[J]. *矿物学报*, 1996, 16(4): 442-449.
- ZHAO J S, NEWBERRY R J. Novel knowledge on the origin and mineralization of skarns from Shizhuyuan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1996, 16(4): 442-449.
- [33] TITLEY S R. "Pyrometamorphic": An alteration type [J]. *Economic Geology*, 1973, 68(8): 1326-1329.
- [34] BURTON J C, TAYLOR L A. The f_{O_2} -T and f_{H_2O} -T stability relations of hedenbergite and of hedenbergite-johannsenite solid solutions [J]. *Economic Geology*, 1982, 77(4): 764-783.
- [35] MEINERT L D, HEFTON K K, MAYES D, et al. Geology, zonation, and fluid evolution of the Big Gossan Cu-Au skarn deposit, Ertsberg district, Irian Jaya[J]. *Economic Geology*, 1997, 92(5): 509-534.
- [36] CALAGARI A A, HOSSEINZADEH G. The mineralogy of copper-bearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East-Azarbaidjan, Iran [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 28(4): 423-438.
- [37] SATO K. Tungsten skarn deposit of the Fujigatani mine, southwest Japan[J]. *Economic Geology*, 1980, 75(7): 1066-1082.
- [38] BROWN P E, ESSENE E J. Activity variations attending tungsten formation, Pine Creek, California [J]. *Nederlands Tijdschrift Voor Geneeskunde*, 1985, 89(4): 358-369.
- [39] KAWK T A. Hydrothermal alteration in carbonate-replacement deposit [J]. *Geological Association of Canada Short Course Notes*, 1994, 11: 381-402.

- [40] 宋国学, 秦克章, 李光明. 长江中下游池州地区矽卡岩-斑岩型 W-Mo 矿床流体包裹体与 H、O、S 同位素研究[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2768-2782.
SONG G X, QIN K Z, LI G M. Study on the fluid inclusions and S-H-O isotopic compositions of skarn-porphry-type W-Mo deposits in Chizhou area in the Middle Lower Yangtze Valley[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2768-2782.
- [41] GASPAR M, KNAACK C, MEINERT L D. REE in skarn system: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(1): 185-205.
- [42] 陈雷, 秦克章, 李光明, 等. 西藏冈底斯南缘努日铜钨钼矿床地质特征与矽卡岩矿物学研究[J]. 矿床地质, 2012, 31(3): 417-437.
CHEN L, QIN K Z, LI G M, et al. Geological and skarn mineral characteristics of Nuri Cu-W-Mo deposit in southeast Gangdese, Tibet[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(3): 417-437.
- [43] LU H Z. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China[J]. Economic Geology, 2003, 98(5): 955-974.
- [44] MISRA K C. Understanding Mineral Deposits[M]. Amsterdam: Kluwer Academic, 2000.
- [45] ZAW K. Formation of magnetite-scheelite skarn mineralization at Kara, Northwestern Tasmania: Evidence from mineral chemistry and stable isotopes[J]. Economic Geology, 2000, 95(6): 1215-1230.
- [46] XIE G Q, MAO J W, ZHU Q Q, et al. Geochemical constraints on Cu-Fe and Fe skarn deposits in the Edong district, Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt, China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 425-444.
- [47] 刘晓菲, 袁顺达, 双燕, 等. 湖南金船塘锡铋矿床石榴子石原位 LA-ICP-MS 稀土元素分析及其意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 163-177.
LIU X F, YUAN S D, SHUANG Y, et al. In situ LA-ICP-MS REE analyses of the skarn garnets from the Jinchuantang tin-bismuth deposit in Hunan Province, and their significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(1): 163-177.
- [48] 彭惠娟, 李洪英, 裴荣富, 等. 云南中甸红牛—红山矽卡岩型铜矿床矿物学特征与成矿作用[J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 237-256.
PENG H J, LI H Y, PEI R F, et al. Mineralogical characteristics and metallogeny of the Hongni-Hongshan copper deposit in Zhongdian area, Yunnan Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(1): 237-256.
- [49] 朱乔乔, 谢桂青, 李伟, 等. 湖北金山店大型矽卡岩型铁矿石石榴子石原位微区分析及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 1944-1963.
ZHU Q Q, XIE G Q, LI W, et al. In situ analysis of garnets from the Jinshandian iron skarn deposit, Hubei Province, and its geological implications[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 1944-1963.
- [50] 王琦, 艾永富. 内蒙古白音诺铅锌矿床富锰单斜辉石与矿化的关系[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1995, 31(2): 224-228.
WANG Q, AI Y F. Study on the Relationship between Mn-rich Clinopyroxene and Metallization in the Baiyinnuo Pb-Zn Deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1995, 31(2): 224-228.
- [51] 梁祥济. 钙铝-钙铁系列石榴子石的特征及其交代机理[J]. 岩石矿物学杂志, 1994, 13(4): 342-353.
LIANG X J. Garnets of grossular-andradite series: their characteristics and metasomatic mechanism[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1994, 13(4): 342-353.
- [52] 梁祥济, 王福生. 接触交代矽卡岩型金矿床形成机理的实验研究[J]. 黄金地质, 2000, 6(1): 1-14.
LIANG X J, WANG F S. Experimental study on the formation mechanism of the contact metasomatic skarn gold deposits[J]. Gold Geology, 2000, 6(1): 1-14.
- [53] 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 等. 安徽铜陵马山金硫矿床稀土元素和稳定同位素地球化学研究[J]. 地质学报, 2007, 81(7): 929-938.
TIAN S H, HOU Z Q, YANG Z S, et al. REE and Stable Isotope Geochemical Characteristics of the Masshan Au-S Deposit in Tongling, Anhui Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(7): 929-938.
- [54] 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 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 Y C, WU Y C, CHU G Z, et al. Geology of copper-gold polymetallic deposits in the along-Changjiang area of Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-351.
- [55] 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 B. Geological features and genetic study of the containing sulfur-magnetite orebody of Xinqiao deposit[J]. Geology of Chemical Minerals, 2003, 25(3): 173-178.

- 173-178.
- [56] 季克俭. 热液矿床成矿元素降低场及其意义[C]//国际交流地质学术论文集(第四集). 北京:地质出版社, 1985: 205-214.
- JI K J. Ore-forming elements depleted zone around hydrothermal deposits, and its significance [C]//Scientific papers on geology for international exchange (Vol. 4). Beijing: Geological Publishing House, 1985: 205-214.
- [57] 林文蔚, 赵一鸣, 蒋崇俊. 矽卡岩矿床中共生单斜辉石-石榴子石特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 1990, 9(3): 195-207.
- LIN W W, ZHAO Y M, JIANG C J. Characteristics of paragenetic clinopyroxene-garnet pairs in skarn deposits and their geological significance[J]. Mineral Deposits, 1990, 9(3): 195-207.
- [58] 洪为, 张作衡, 赵军, 等. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(2): 191-211.
- HONG W, ZHANG Z H, ZHAO J, et al. Mineralogy of the Chagangnuoer iron deposit in Western Tianshan Mountains, Xinjiang, and its geological significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31(2): 191-211.
- [59] 田明君, 李永刚, 万浩章, 等. 江西永平铜矿矽卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(12): 3741-3758.
- TIAN M J, LI Y G, WAN H Z, et al. Characteristics of skarn minerals in Yongping copper deposit, Jiangxi Province, and geological significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(12): 3741-3758.
- [60] MEINERT L D. Skarns and skarn deposits[J]. Geoscience Canada, 1992, 19(4): 145-163.
- [61] 艾永富, 金玲年. 石榴石成分与矿化关系的初步研究[J]. 北京大学学报, 1981, 17(1): 83-90.
- AI Y F, JIN L N. The study of the relationship between the mineralization and the garnet in the skarn ore deposits[J]. Journal of Peking University, 1981, 17(1): 83-90.
- [62] NAKANO T, YOSHINO T, SHIMAZAKI H, et al. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits[J]. Economic Geology, 1994, 89(7): 1567-1580.
- [63] 赵一鸣, 张轶男, 林文蔚. 我国矽卡岩矿床中辉石和似辉石特征及其与金属矿化的关系[J]. 矿床地质, 1997, 16(4): 318-329.
- ZHAO Y M, ZHANG Y N, LIN W W. Characteristics of pyroxenes and pyroxenoids in skarn deposits of China and their relationship with metallization [J]. Mineral Deposits, 1997, 16(4): 318-329.
- [64] KARIMZADEH S A. Garnet composition as an indicator of Cu mineralization: Evidence from skarn deposits of NW Iran[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2004, 81(1): 47-57.
- [65] KARIMZADEH S A. Garnetization as a ground preparation process for copper mineralization: Evidence from the Mazraeh skarn deposit, Iran[J]. International Journal of Earth Sciences, 2010, 99(2): 343-356.

Skarn mineralogical characteristics and ore sulfur isotope geochemistry of Tianmashan sulfur-gold deposit, Tongling area

ZHOU Shuguang^{1,3}, CAI Yang^{2,3}, DU Jianguo^{2,3}, WU Shuo^{1,3}, SHI Ke^{2,3}, LI Ziteng^{2,3}

(1. Mineral Resource Center, Tongling Nonferrous Metals Group Holdings Co., Ltd, Tongling 244000, Anhui, China;

2. Geological Survey of Anhui Province (Anhui Institute of Geological Sciences), Hefei 230001, Anhui, China;

3. Engineering Research Center of Deep Resource Exploration of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: The Tianmashan sulfur-gold deposit is a typical stratabound hydrothermal superimposed reformed deposit in the Tongling ore concentration area and hosts abundant skarn minerals in major bedded ore body. In order to ascertain the skarn minerals types and ore-forming setting of Tianmashan deposit and explore the relationship between skarnization and mineralization, the mineralogy and mineral chemistry of main skarn minerals, and the geochemistry of its sulfur isotope were studied. The research shows that the

skarn minerals in Tianmashan deposit are mainly comprised of garnet and pyroxene. Most of garnet are andradites, belonging to andradite-grossular series ($\text{Gro}_{0\sim 18.73}\text{And}_{80.54\sim 99.00}\text{Spe}+\text{Pyr}+\text{Alm}_{0.54\sim 1.47}$). Pyroxene is dominated by diopside, followed by hedenbergite, thus can be listed into diopside-hedenbergite series ($\text{Di}_{62.35\sim 97.65}\text{Hd}_{1.89\sim 36.27}\text{Jo}_{0.31\sim 1.55}$). The mineral assemblage (andradite and diopside) in Tianmashan sulfur-gold deposit is attributed as oxidized skarn, indicating the skarn diagenetic conditions of relatively high temperature and high oxygen fugacity. The characteristics of the end-member components in garnet and pyroxene, and the lower pyroxene Mn/Fe ratio ($0.02\sim 0.07$) were similar to those in the typical skarn copper and gold deposits. The sulfur isotopes of ore with magmatic hearth features were consistent with Yanshanian magmatic-metallogenic ore, but obviously different from sedimentary exhalative deposit, indicating that the mineralization was closely related to Yanshanian magmatic activity. Due to the metasomatism of Yanshanian acidic magma, a large amount of skarn was formed in the carbonate surrounding rocks. The formation of skarn minerals increased the porosity and permeability of rock, which were conducive to the later formation of sulfur-gold deposits.

Key words: Tongling ore concentration area, Anhui; Tianmashan sulfur-gold deposit; skarn minerals; sulfur isotope; ore-forming condition

实现城市地下透明 助力数字城市建设

由中国地质调查局南京地质调查中心等联合承担的“杭州城市地质数据库与三维地质模型构建”项目验收获评优秀级,有关成果获得高度认可。

项目创造了多个“首次”:一是全面集成了以往地质成果,首次建立了杭州“十区”范围内城市地质数据库,入库数据量 350 GB,完成 56 672 个工程勘察钻孔标准化,构建全市和 6 个重点规划区不同尺度三维地质模型;二是利用地质、物探、测井、试验测试等多源数据,首次高质量构建了多尺度三维地质模型,充分展现了不同地质体的空间分布特征和属性特征,并开展了地下资源评价,提出了地下空间分层开发利用建议;三是在第四纪地质结构和沉积环境研究基础上,首次高标准编制了杭州市岩土工程地质层划分标准,为提高杭州市工程地质勘察质量,推进杭州市工程勘察资料汇交提供技术支撑;四是首次以钱江新城核心区为示范,构建了城市地上地下一体化高精度模型示范,平台在地质数据共享、地质环境监测、安全风险防范与规划决策服务上的优势,为杭州市地下智慧感知体系建设提供平台支撑;五是制定了城市地质数据汇交与共享机制,推动地方出台“工程建设项目地质勘察数据汇交管理规定”,实现杭州市地质调查资料的汇聚整合与共享,为城市地质数据更新提供制度保障。

项目成果支撑了杭州地下隐患智防、空间智治等信息平台建设,支撑编制了杭州地质安全风险“一张图”编制和城市地质安全风险区划技术体系,支撑开展了杭州市地面塌陷风险、岩溶塌陷风险评价与区划,为推进浙江省城市运行地质风险防控,指导和规范各地城市地质安全风险“一张图”编制提供示范引领。