

文章编号: 1009-3850(2013)03-0101-12

江浪矿田主成矿元素及伴生金银的赋存状态

戴 婕, 徐金沙, 潘晓东, 张 茜, 王坤阳

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081)

摘要: 运用扫描电子显微镜(SEM)及其配套的背散射电子像功能、能谱仪(EDS)鉴定功能以及电子探针波谱分析功能,初步查明了江浪矿田内里伍矿床、黑牛铜矿床、挖金沟矿床、笋叶林矿床、中咀矿床中的主要成矿元素Cu、Zn、Fe、S及其重要伴生元素Au、Ag的赋存状态。该研究成果可为矿产资源的选矿、资源的合理充分利用、环境保护等提供有价值的参考资料。

关键词: 江浪矿田; 主成矿元素; 伴生金银; 赋存状态

中图分类号: TD982

文献标识码: A

1 地质背景与矿床特征

江浪矿田位于扬子地台西侧江浪穹隆构造内的变质核杂岩中(图1),包括里伍、黑牛洞、挖金沟、柏香林、中咀、上海底、白岩子、笋叶林等铜矿床(点)(图2),面积约130km²,属四川省九龙县所管辖^[1-2]。

江浪矿田区(江浪穹隆构造核部)出露中元古界里伍岩群(Pt₂L),岩性以云母片岩、云母石英片岩、片状石英岩为主,夹斜长角闪岩即变基性岩,其原岩为一套含基性火山岩的沉积碎屑岩建造。主要含矿层位为中元古界里伍岩群中段(Pt₂L²)。区内主要构造为江浪背形构造和环状剥离断裂构造。岩浆岩为斜长角闪岩、长英质变粒岩,变质基性次火山岩、变质中碱性次火山岩,主要分布于里伍岩群中段,呈条带状、透镜体产出。

江浪矿田内各矿床的特征相似,矿床均产于含矿蚀变带内,矿体在蚀变带中成群成带产出,矿体形态以扁豆状、似层状、透镜状为主,在垂向上呈交错重叠或平行重叠。由于控制矿体的片理破碎带与岩性界面平行,局部有小角度斜交(图3A),所以矿体出现顺“层”与穿“层”的特征。

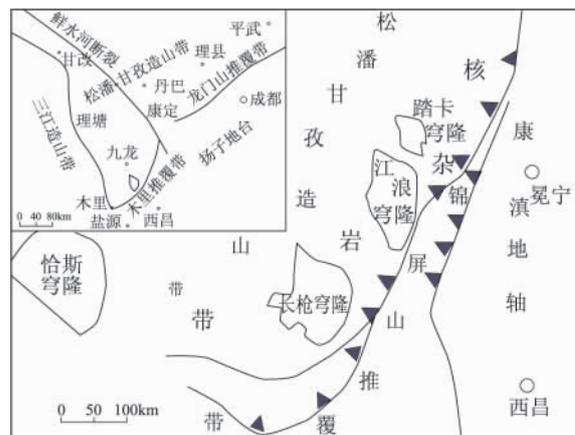


图1 江浪矿田区域地质略图

Fig. 1 Schematic regional geological map of the Jianglang ore field

江浪矿田内发育的矿石类型主要有:浸染状矿石、条带矿石、脉状矿石、团块状矿石、致密块状矿石和石英(电气石)脉型矿石(图3B-D)。不同的矿石类型具有一定的分布特征:致密块状矿石往往分布于矿体的中部;条带、脉状、团块状矿石以及石英脉型矿石分布于矿体的边部;而浸染状矿石分布于靠近矿体的围岩中^[3]。矿石结构包括自形晶结构、半自形-它形粒状结构、碎裂结构、包含结构、共边结

收稿日期: 2012-08-10; 改回日期: 2013-04-17

作者简介: 戴婕(1982-),女,硕士,主要从事矿物岩石研究。E-mail: daijiegirl@163.com



图2 江浪矿田各矿床分布图

Fig. 2 Distribution of individual ore deposits in the Jianglang orefield

构、交代残余构造、眼球状构造等(图4)。

江浪矿田各矿床中的矿石矿物主要为黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿,含少量方黄铜矿、斑铜矿、方铅矿、钛铁矿等,伴生金银矿,脉石矿物主要为石英、绢云母、白云母、黑云母、绿泥石、长石等。

2 分析及实验条件

2.1 分析方法

主要包括电子探针波谱分析、扫描电镜能谱分析和背散射电子像分析,实验皆在国土资源部西南监督检查中心完成。电子探针的型号为:EPMA-1600,为日立岛津公司生产,其定量分析实验条件初步定为:加速电压为20kV,束流10nA,束斑 $3\mu\text{m}$ 。扫描电子显微镜型号为:S-4800冷场发射扫描电子显微镜(配能谱仪及线面扫描功能),为日本日立公司生产。

2.2 实验条件

(1) 样品制备

将矿石样品磨制成镜面抛光的光片,对于非导电的试样,其表面喷镀一层碳膜以消除电荷效应,然后放入盛有干燥剂的容器中静置24h。

(2) 实验条件选择

a. 背散射电子像观察

采用背散射电子像观察样品的组分变化是研究成矿元素赋存状态的有效手段之一,根据需观察元素的原子序数高低,评估所测试矿物的平均原子

序数,选择适当的对比度,在低放大倍率下移动样品,观察图像的灰度变化情况,捕捉相应的灰度信息进行定性、定量以及线扫描和面扫描分析。

b. 能谱仪、波谱仪特征 X 射线线面扫描的分析条件

① 电流的选择

电流强度与元素检出限成正比,即电流越强,元素检出限越低,脉冲强度计数也越大,但噪音也会随之增加。考虑到仪器本身的特点和样品的特征,本次测试选用的发射电流为 $10\mu\text{A}$ 。

② 加速电压的选择

电压的选择首先必须满足所选择的分析电压为被激发电子能量的2~3倍,本次测试选择电压为20keV。

③ 时间的选择

常量元素分析选择120s/点,线分析的时间一般为40min/线,面分析的时间1~5h。对低含量元素,时间越长效果越好,即点分析的成分含量更准确,线分析的元素分布曲线更准确以及面分析的图像更清晰,边界更明显。但是由于电子束轰击的时间越长,样品的耐热度和导电性等因素影响,容易产生漂移,使得测试结果反而更不准确。

3 主成矿元素 Cu、Zn、Fe、S 赋存状态

3.1 Cu 元素的赋存状态

从镜下可见到的铜矿物主要为黄铜矿,含少量方黄铜矿及铜的次生氧化物铜兰。利用电子探针,对黄铜矿做了进一步原位成分分析。表1中列出分析结果,黄铜矿中S含量为33.144%~34.986%,平均为33.979%,平均值低于标准值;含Fe为30.379%~31.828%,平均为31.098%,平均值高于标准值;含Cu为32.631%~33.635%,平均为33.134%,平均值低于标准值。从主成矿元素含量较标准值来看,研究区的黄铜矿贫S和Cu,富Fe。

江浪矿田中黄铜矿还普遍含有As、Mo,大部分黄铜矿含有Au、Ag、Se,个别含有Mn、Ga。As的含量范围为0.209%~0.337%(平均为0.283%);Mo的含量范围为0.174%~0.307%(平均为0.236%);Au的含量范围为0.000%~0.085%;Ag的含量范围为0.000%~0.039%,平均为0.011%;Se的含量范围为0.000~0.048%,平均为0.010%。22个测试点中,有3个点含有Mn,含量最多点为0.018,最少为0.007,22个点的平均值为0.002%;22个点中仅有1个点含有0.060%的Ga。

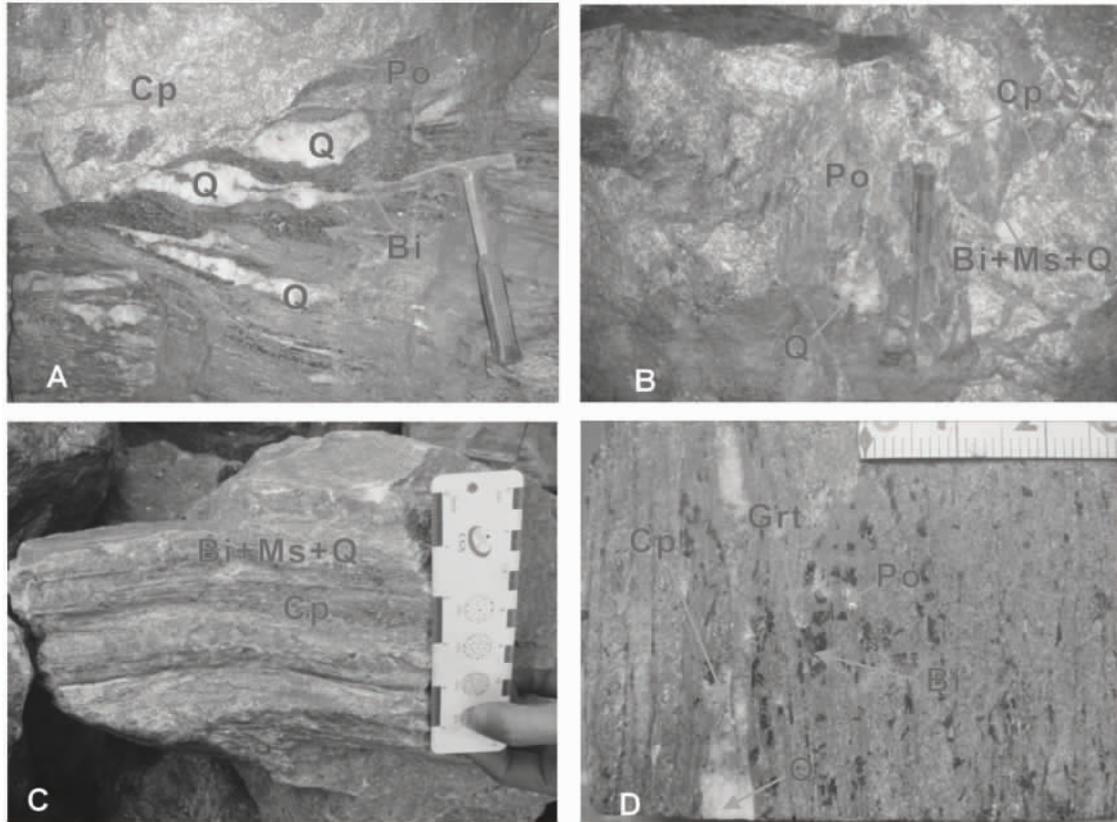


图3 江浪矿田中矿石特征

A. 致密块状矿石与围岩有小角度斜交,石英与周边黑云母组成的眼球构造明显; B. 块状矿石与围岩紧密共生 构造变形强烈; C. 条带状黄铜矿矿石,矿石随围岩层理分布,有明显构造变形; D. 石榴石云母石英片岩,黄铜矿沿片理分布 Cp. 黄铜矿; Po. 磁黄铁矿; Bi. 黑云母; Ms-白云母; Q. 石英; Grt. 石榴石

Fig. 3 Ore types and distribution in the Jianglang orefield

A. Low-angle oblique crossing of dense massive ores and wall rocks ,and well-defined augen structures composed of quartz and biotite; B. Close paragenesis of massive ores and wall rocks; C. Banded chalcopyrite ores along the bedding planes of the wall rocks; D. Garnet mica quartz schist , showing the distribution of chalcopyrite along the schistosity planes. Cp = chalcopyrite; Po = pyrrhotite; Bi = biotite; Ms = muscovite; Q = quartz; Grt = garnet

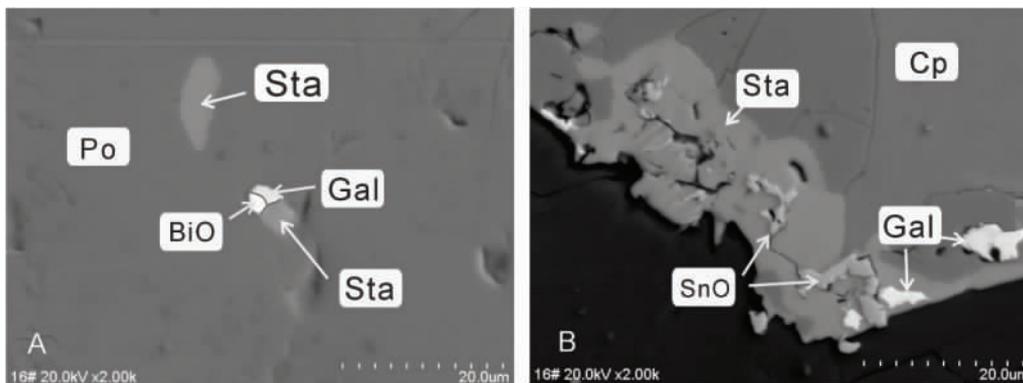


图5 背散射电子像

A. 黄锡矿(Sta)以独立矿物或与铋氧化物(BiO)、方铅矿(Gal)共生包裹在磁黄铁矿(Po)中; B. 黄锡矿(Sta)沿黄铜矿(Cp)的边缘分布

Fig. 5 Backscattered electron images for stannite

A. Stannite (Sta) as an isolated mineral and/or associated with bismuth oxides (BiO) or galena (Gal) wrapped in pyrrhotite (Po); B. Stannite (Sta) scattered around chalcopyrite (Cp)

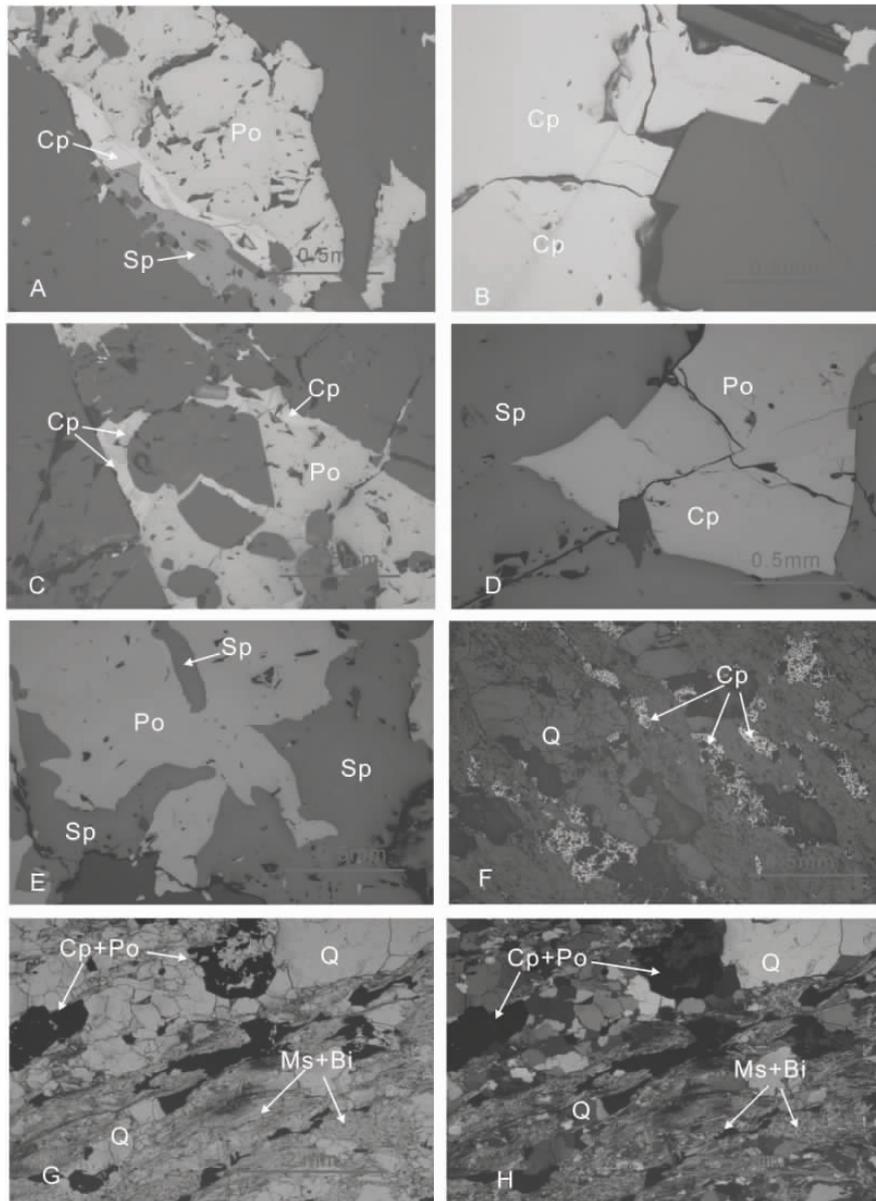


图4 江浪矿田矿石的结构构造

A. 磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿紧密共生,黄铜矿、闪锌矿拉长现象明显,形成条带状构造; B. 黄铜矿为自形-半自形晶结构,与非金属矿物紧密共生,形成共边结构; C. 黄铜矿沿着磁黄铁矿的边部分布,金属矿物包裹部分非金属矿物结晶成矿,形成包含结构; D. 黄铜矿与磁黄铁矿紧密共生,晚于闪锌矿成矿,黄铜矿交代闪锌矿,形成交代结构; E. 闪锌矿与磁黄铁矿同时成矿,并相互交代,形成交代结构; F. 黄铜矿沿片理和非金属矿物晶间裂隙分布,形成稠密浸染状-条带状构造; G. 偏光显微镜下(单偏光),二云母石英片岩中的金属矿物分布在石英的晶间裂隙和云母的片理面上,形成片状构造; H. 偏光显微镜下(正交偏光),二云母石英片岩中的金属矿物分布在石英的晶间裂隙和云母的片理面上,形成片状构造。 Cp. 黄铜矿; Po. 磁黄铁矿; Bi. 黑云母; Ms. 白云母; Q. 石英

Fig. 4 Textures and structures of the ores from the Jianglang orefield

A. Banded structure caused by the elongation of chalcopyrite and sphalerite; B. Edge-sharing structures created by the close paragenesis of chalcopyrite with euhedral-subhedral textures and nonmetallic minerals; C. Poikilitic textures formed by the inclusion of nonmetallic minerals by metallic minerals; D. Metasomatic textures resulted from the metasomatism of sphalerite by chalcopyrite; E. Metasomatic textures resulted from coeval mineralization and metasomatism of sphalerite and pyrrhotite; F. Densely disseminated-banded structures of chalcopyrite along schistosity planes and intercrystal fissures of nonmetallic minerals; G. Schistose structures formed due to the occurrence of the metallic minerals in two-mica quartz schist in the intercrystal fissures of quartz and schistosity planes of mica, plane-polarized light; H. Schistose structures formed due to the occurrence of the metallic minerals in two-mica quartz schist in the intercrystal fissures of quartz and schistosity planes of mica, cross-polarized light. Cp = chalcopyrite; Po = pyrrhotite; Bi = biotite; Ms = muscovite; Q = quartz

通过扫描电镜背散射电子像的观察(图5)和能谱成分分析(表2),Cu元素还以黄锡矿矿物存在。黄锡矿以独立矿物包裹体、或与铋氧化物、方铅矿共生包裹在磁黄铁矿中,黄锡矿还分布在黄铜矿的边缘。

表1 黄锡矿能谱成分分析结果

Table 1 Energy spectrum analyses of stannite

元素	S	Fe	Cu	Sn	总量
1	31.16	14.17	26.88	27.79	100.00
2	31.66	17.77	25.07	25.50	100.00
3	31.81	18.96	24.12	23.73	98.63
4	30.40	12.61	28.46	28.53	100

表2 江浪矿田黄铜矿电子探针分析结果

Table 2 Microprobe analyses (%) of chalcopyrite from the Jianglang orefield

元素 点号	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	总量
A ₂ -8-1	34.581	0.000	31.386	0.000	33.135	0.000	0.000	0.224	0.000	0.231	0.014	0.026	0.000	99.595
A ₂ -8-2	33.648	0.000	31.424	0.000	32.631	0.000	0.000	0.266	0.024	0.202	0.000	0.000	0.000	98.195
A ₂ -8-3	33.144	0.000	31.130	0.000	32.635	0.000	0.000	0.254	0.000	0.192	0.001	0.014	0.000	97.369
A ₂ -8-4	34.788	0.000	31.693	0.000	32.735	0.000	0.000	0.273	0.000	0.280	0.038	0.000	0.000	99.807
A ₂ -8-5	33.811	0.000	31.257	0.000	32.975	0.000	0.000	0.261	0.011	0.307	0.012	0.038	0.000	98.673
A ₂ -8-6	33.671	0.000	31.376	0.000	32.864	0.000	0.000	0.278	0.004	0.203	0.029	0.000	0.000	98.425
A ₂ -8-7	33.711	0.018	31.828	0.000	33.137	0.000	0.000	0.308	0.000	0.252	0.008	0.000	0.000	99.262
A ₂ -8-8	33.618	0.000	31.277	0.000	32.848	0.000	0.000	0.323	0.024	0.226	0.003	0.069	0.000	98.388
A ₂ -8-9	33.760	0.000	31.189	0.000	32.766	0.000	0.000	0.286	0.000	0.291	0.010	0.039	0.000	98.342
HN ₁₃ -1	34.256	0.000	30.379	0.000	33.024	0.000	0.000	0.289	0.048	0.255	0.000	0.000	0.000	98.251
HN ₁₃ -2	33.704	0.000	30.731	0.000	33.009	0.000	0.060	0.335	0.000	0.184	0.039	0.002	0.000	98.064
HN ₁₃ -3	33.558	0.007	30.588	0.000	33.629	0.000	0.000	0.333	0.007	0.262	0.000	0.000	0.000	98.384
HN ₁₃ -4	33.462	0.000	30.868	0.000	33.340	0.000	0.000	0.337	0.000	0.174	0.031	0.020	0.014	98.246
HN ₁₃ -5	33.890	0.000	30.457	0.000	33.238	0.000	0.000	0.272	0.000	0.191	0.000	0.048	0.038	98.134
HN ₁₃ -6	33.877	0.000	30.598	0.000	33.140	0.000	0.000	0.308	0.000	0.205	0.011	0.011	0.000	98.148
HN ₁₃ -7	33.760	0.011	30.729	0.000	33.241	0.000	0.000	0.248	0.017	0.235	0.025	0.015	0.000	98.282
HN ₁₃ -8	34.986	0.000	31.300	0.000	33.446	0.000	0.000	0.298	0.020	0.284	0.000	0.085	0.000	100.418
HN ₁₃ -9	33.813	0.000	30.960	0.000	33.393	0.000	0.000	0.242	0.033	0.220	0.000	0.074	0.000	98.735
HN ₁₃ -10	34.622	0.000	31.518	0.000	33.581	0.000	0.000	0.301	0.002	0.269	0.001	0.000	0.000	100.293
HN ₁₃ -11	34.172	0.000	31.218	0.000	33.467	0.000	0.000	0.274	0.000	0.274	0.000	0.000	0.000	99.408
HN ₁₃ -12	34.537	0.000	31.299	0.000	33.635	0.000	0.000	0.303	0.009	0.184	0.000	0.015	0.000	99.983
HN ₁₃ -13	34.173	0.000	30.952	0.000	33.081	0.000	0.000	0.209	0.017	0.275	0.011	0.056	0.000	98.773
平均	33.979	0.002	31.098	0.000	33.134	0.000	0.003	0.283	0.010	0.236	0.011	0.023	0.002	98.781

3.2 Zn的赋存状态

表3中列出了江浪矿田闪锌矿的电子探针分析结果。闪锌矿中S范围为31.644%~33.418%,平均为32.575%,平均值略低于标准值;含Fe范围8.369%~11.213%,平均为9.165%;含Zn范围为53.028%~58.220%,平均为56.447%,平均值低于标准值。从主成矿元素含量较标准值来看,贫S和Zn,富Fe。

江浪矿田的闪锌矿中还普遍含有As、Mo、Mn,大部分含有Ag、Se,个别含有Au、Pb。As的含量范围为0.039%~0.167%,平均为0.076%;Mo的含量范围为0.141%~0.273%,平均为0.194%;Mn的含量范围为0.000%~0.279%。11个测试点中有6个点分别含有Ag和Se。Ag的含量范围为0.000%~0.055%,平均为0.012%;Se的含量范围为0.000%~0.035%,平均为0.007%。11个点中仅两个点分别含有Au和Pb,Au为0.076%和

0.046%,Pb为0.025和0.041%。

3.3 Fe、S元素的赋存状态

从表4中磁黄铁矿的电子探针分析结果中可以看出Fe元素占磁黄铁矿成分的31.299%,为磁黄铁矿的主要组成元素之一。除此之外还分布在闪锌矿、黄铜矿中。结合上述电子探针的分析结果,S元素主要分布在黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄锡矿等金属硫化物中。

江浪矿田的磁黄铁矿中还普遍含有As、Mo,大部分含有Au、Ag、Se、Zn、Cu,个别含有Mn、Pb。As的含量范围为0.000%~0.571%,平均为0.0446%;Mo的含量范围为0.178%~0.325%,平均为0.236%;Au的含量范围为0.000%~0.140%;Ag的含量范围为0.000%~4.026%,平均为0.299%;Se的含量范围为0.000%~0.031%,平均为0.009%;Zn的含量范围为0.000%~0.112%,平均为0.023%;Cu的含量范围为0.000%

表3 江浪矿田闪锌矿电子探针分析结果

Table 3 Microprobe analyses (%) of sphalerite from the Jianglang orefield

元素 点号	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	总量	FeS%	Zn/Fe
A2-8-1	32.525	0.000	8.921	0.000	0.000	56.346	0.000	0.097	0.000	0.169	0.055	0.000	0.000	98.114	15.694	5.394
A2-8-2	32.511	0.010	8.369	0.000	0.000	57.803	0.000	0.069	0.000	0.223	0.020	0.000	0.000	99.006	14.637	5.899
HN-13-1	31.644	0.173	9.114	0.000	0.000	57.796	0.000	0.053	0.000	0.179	0.001	0.046	0.000	99.010	16.048	5.416
HN-13-2	31.706	0.342	9.219	0.000	0.000	58.187	0.000	0.099	0.006	0.143	0.000	0.000	0.025	99.726	16.155	5.390
HN-13-3	33.418	0.206	11.213	0.000	0.000	53.028	0.000	0.039	0.010	0.197	0.004	0.000	0.041	98.157	19.552	4.039
H22-1	32.906	0.361	8.865	0.000	0.000	55.850	0.000	0.052	0.019	0.141	0.000	0.076	0.000	98.270	15.570	5.380
H22-2	32.375	0.433	9.187	0.000	0.000	55.917	0.000	0.064	0.000	0.150	0.000	0.000	0.000	98.126	16.124	5.198
H22-3	32.802	0.417	8.632	0.000	0.000	58.220	0.000	0.045	0.001	0.219	0.000	0.000	0.000	100.336	14.950	5.760
H22-4	32.401	0.403	8.949	0.000	0.000	56.389	0.000	0.070	0.000	0.267	0.025	0.000	0.000	98.503	15.764	5.381
H22-5	33.407	0.341	9.680	0.000	0.000	54.904	0.000	0.167	0.035	0.273	0.000	0.000	0.000	98.807	16.871	4.844
H22-6	32.626	0.383	8.669	0.000	0.000	56.478	0.000	0.079	0.010	0.176	0.028	0.000	0.000	98.449	15.246	5.564
平均	32.575	0.279	9.165	0.000	0.000	56.447	0.000	0.076	0.007	0.194	0.012	0.011	0.006	98.773	16.065	5.260

表4 江浪矿田磁黄铁矿电子探针分析结果

Table 4 Microprobe analyses (%) of pyrrhotite from the Jianglang orefield

元素 点号	S	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Mo	Ag	Au	Pb	总量	nFe	ns	nFe/ns	nFe%
A2-8-1	37.213	0.000	60.562	0.000	0.000	0.084	0.000	0.442	0.000	0.242	0.025	0.140	0.000	98.709	1.084	1.161	0.934	48.306
A2-8-2	36.987	0.000	61.396	0.000	0.008	0.000	0.000	0.459	0.003	0.234	0.000	0.059	0.000	99.170	1.099	1.153	0.953	48.800
A2-8-3	36.396	0.005	60.899	0.000	0.000	0.027	0.000	0.481	0.005	0.180	0.005	0.000	0.000	97.999	1.091	1.135	0.961	48.999
A2-8-4	36.546	0.000	60.635	0.000	0.000	0.112	0.000	0.525	0.010	0.221	0.035	0.008	0.000	98.092	1.086	1.140	0.953	48.788
A2-8-5	36.743	0.000	60.893	0.000	0.008	0.067	0.000	0.438	0.000	0.188	0.000	0.000	0.041	98.380	1.090	1.146	0.952	48.760
A2-8-6	36.965	0.000	60.349	0.000	0.000	0.006	0.000	0.461	0.031	0.325	0.000	0.053	0.003	98.193	1.081	1.153	0.937	48.385
A2-8-7	37.535	0.009	61.244	0.000	0.000	0.000	0.000	0.442	0.030	0.235	0.000	0.097	0.000	99.591	1.097	1.171	0.937	48.371
A2-8-8	37.204	0.001	60.780	0.000	0.000	0.000	0.000	0.449	0.011	0.248	0.010	0.000	0.032	98.735	1.088	1.160	0.938	48.402
A2-8-9	37.669	0.000	61.043	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.178	0.011	0.000	0.000	99.335	1.093	1.175	0.930	48.200
HN-13-1	34.558	0.018	57.296	0.000	0.269	0.000	0.000	0.404	0.000	0.219	4.026	0.079	0.000	96.869	1.026	1.078	0.952	48.770
207H221	38.213	0.000	62.432	0.000	0.014	0.010	0.000	0.540	0.000	0.265	0.029	0.000	0.008	101.511	1.118	1.192	0.938	48.404
207H222	37.964	0.007	61.916	0.000	0.007	0.003	0.000	0.523	0.015	0.216	0.021	0.000	0.000	100.673	1.109	1.184	0.936	48.360
207H223	38.615	0.000	61.477	0.000	0.034	0.006	0.000	0.515	0.016	0.294	0.021	0.000	0.000	100.978	1.101	1.204	0.914	47.757
207H224	38.140	0.000	60.967	0.000	0.000	0.000	0.000	0.571	0.010	0.259	0.000	0.000	0.042	99.987	1.092	1.189	0.918	47.858
平均	37.196	0.003	60.849	0.000	0.024	0.023	0.000	0.446	0.009	0.236	0.299	0.031	0.009	99.159	1.090	1.160	0.940	48.440

~0.269%, 平均为 0.024%。14 个测试点中, 有 5 个点含有 Mn, 含量最多点为 0.018, 最少为 0.001, 14 个点的平均值为 0.003%; 14 个点中有 5 个点含有 Pb, 含量最多点为 0.042%, 最少为 0.003%, 14 个点的平均值为 0.009%。

4 伴生金、银赋存状态

4.1 金元素赋存状态

4.1.1 金元素独立矿物相

用扫描电镜的能谱分析功能, 分析了 8 个含金矿物, 分析结果如表 5 所示。金的质量分数最高达 26.20%, 最低为 10.55%, 平均为 18.71%。这些含金矿物中, 含量最多的为 Ag, 其质量分数最高达 63.95%, 最低为 36.17%, 平均为 48.79%。忽略基体成分 S、Fe、Cu、Al、Si、Zn、Bi 等元素的干扰, 这些矿物的化学式大致计算为: $Au_{0.2}Ag_{1.0}$, 由此可以判定金的独立矿物相为金银矿。通过扫描电镜观察, 这

些金银矿绝大部分分布在主矿物的颗粒裂隙中(图6),为裂隙金,这些金矿物颗粒细小,初步估计为几个纳米到几个微米不等。

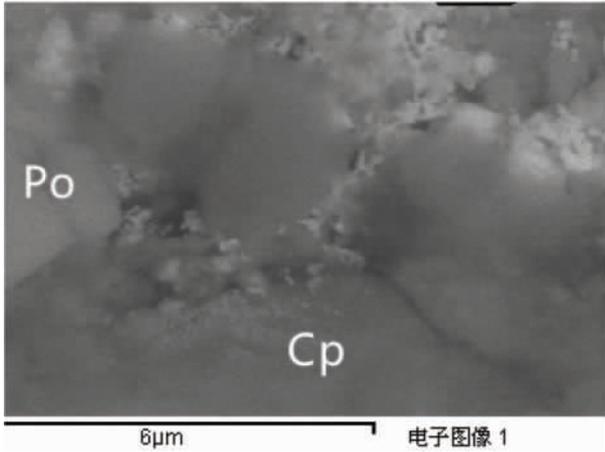


图6 金银矿分布在黄铜矿(Cp)和磁黄铁矿(Po)的裂隙中(背散射电子像)
Fig. 6 Backscattered electron images for kustelite in the fissures between chalcopyrite (Cp) and pyrrhotite (Po)

4.1.2 金元素类质同像矿物

选择该矿物背散射电子像明暗分布变化(即矿物成分变化)较明显的部位进行线定位,测试 Au 元素在该矿物直线中的含量分布情况(图7、图8)。在线分析图像中,由于 Au 元素的含量较其他元素低,所以在图7和图8中很难看出 Au 的含量情况及与其他元素的相关关系。

因此,采取峰值曲线累加的方法,将 Au 元素在该直线上的含量分布情况放大累加显示出来(图9)。可以看出,Au 的含量在该直线较背景值含量高,并重复出现4个波峰峰值。由此说明,Au 元素在该直线上的分布有变化,分别以类质同像的形式分布在含银的单矿物和含铜的单矿物中。该载金矿物又嵌布于磁黄铁矿中。

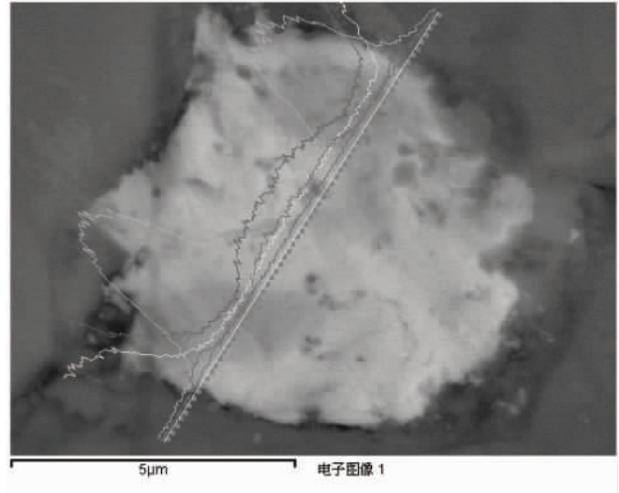


图7 含金矿物的线扫描图像

Fig. 7 Linear scanning images for the gold-bearing minerals

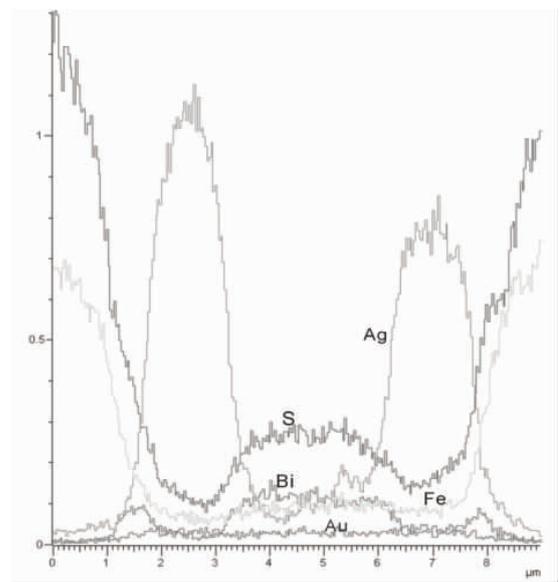


图8 含金矿物线扫描放大图像

Fig. 8 Magnified linear scanning images for the gold-bearing minerals

表5 含金矿物成分分析结果

Table 5 Mineral compositions of the gold-bearing minerals

元素 点号	S	Fe	Cu	Ag	Au	Al	Si	Zn	Bi	总量
1	8.60	18.42	-	55.98	17.00	-	-	-	-	100.00
2	14.11	17.77	2.98	47.34	17.80	-	-	-	-	100.00
3	17.01	18.99	5.00	48.46	10.55	-	-	-	-	100.00
4	9.58	11.39	0.68	52.46	24.64	0.48	0.77	-	-	100.00
5	6.52	8.97	0.89	63.95	19.66	-	-	-	-	100.00
6	14.83	1.45	0.66	41.76	16.44	-	-	4.57	13.75	100.00
7	14.31	2.95	0.78	36.17	26.20	-	-	-	-	100.00
8	14.52	1.23	4.46	44.19	17.36	-	-	5.85	18.23	100.00
平均	12.44	10.15	2.21	48.79	18.71					

-表示含量在仪器检测范围之下

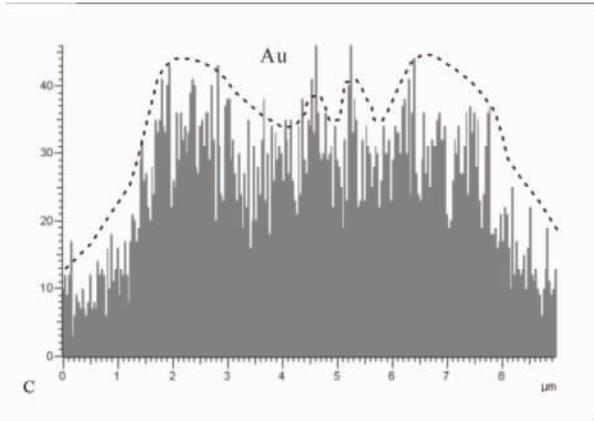


图9 金元素的峰值累加曲线

Fig.9 Peak accumulation curve for the element Au

4.3.3 金赋存状态

金主要以独立金矿物金银矿形式分布在黄铜矿、磁黄铁矿的裂隙中,并以类质同像形式普遍分布在黄铜矿、磁黄铁矿中,少量以类质同像的形式分布在铋矿物和银矿物中。

4.2 银赋存状态

4.2.1 银独立矿物相

通过大量的电子探针分析,发现在18个点中 Ag 的含量为:4.87%~96.68%。从图10中点1、点2的分析结果(表6)可以看出,Ag的质量分数最高达96.68%,排除基体成分干扰,确定该矿物为单质银。用同样的方法,将其余16个点的成分分析结果化学式计算大致为: $Ag_{1.91}(Cu_{0.35}Fe_{0.36}Pb)_{1.71}(Se_{0.12}Te_{0.13}S_{4.5})_{4.75}$ 块硫铋铅银矿; $Ag_{1.00}(Cu_{1.20}Fe_{2.01})_{3.21}Bi_{2.51}(Te_{0.65}S_{5.70})_{6.35}$ 硫铋银矿; $Ag_{2.86}(Cu_{0.20}Fe_{0.17}Pb_{1.00})_{1.37}Bi_{2.39}(Se_{0.22}Te_{0.14}S_{6.11})_{6.47}$ 块辉铋铅银矿; $Ag_{2.00}Te_{1.00}$ 碲银矿; $Ag_{5.54}Au_{1.20}(Cu_{0.15}Fe_{0.37}Zn_{1.00})_{1.52}Bi_{1.39}S_{6.62}$ 硫铋金银矿; $Ag_{1.09}(Fe_{0.26}Cu_{0.29})_{0.55}Bi_{1.47}Te_{1.00}S_{2.77}$ 碲铋银矿; $Ag_{1.57}(Fe_{0.18}Cu_{0.08})_{0.26}Bi_{0.29}Te_{1.00}U_{0.06}S_{0.73}$ 碲银矿。

从表中分析也可初步确定 Ag 元素以类质同像的形式分布在自然铋(表6点3)、叶碲铋矿(表6、图10点5、9)、方铅矿(表6、图10点7)中。

4.2.2 银元素类质同像形式存在

在磁黄铁矿矿物颗粒的裂隙中见5μm左右的含银的矿物,对含银的矿物进行面扫描分析(图11)。从图中可以看出,该矿物周边的Fe、S元素的面扫描图的亮度基本一致,而Ag元素的分布与Bi元素的分布特征基本相反,可以推测Ag元素类质同像替代了部分Bi元素,因此认为,Ag元素以类质同像的形式分布在单质铋中。

4.2.3 银元素赋存状态

银元素主要以独立银矿物单质银、块硫铋铅银矿、硫铋银矿、块辉铋铅银矿、碲银矿、硫铋金银矿、碲铋银矿、碲银矿的形式存在,这些银矿物主要包裹在黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿中。Ag还以类质同像形式普遍分布在黄铜矿、磁黄铁矿中,也有少量的Ag以类质同像的形式分布在铋矿物如:单质铋、自然铋、叶碲铋矿中,或方铅矿中。

5 讨论与结论

5.1 主成矿元素 Cu-Fe-Zn-S 系列元素分布特征

(1) 主成矿元素赋存特征

江浪矿田中 Cu 元素主要赋存于黄铜矿,少量赋存于方黄铜矿、铜兰及黄锡矿中,极少量以类质同像形式分布于磁黄铁矿和银矿物中; Fe 元素主要分布在矿石矿物黄铜矿、磁黄铁矿中和闪锌矿中; S 元素主要分布在黄铜矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄锡矿等金属硫化物中。

(2) 典型铜矿床黄铜矿成分对比分析

将江浪矿田中主要经济价值矿物黄铜矿的成分特征与其他类型的铜矿床中黄铜矿的成分做对比分析。典型的铁氧化物铜金矿床(OICG)拉拉铜矿中黄铜矿的元素含量稳定^[6,7],S的含量平均为34.91%;Fe含量平均为30.03%;Cu的含量平均为34.78%,含少量Co(0.03%~0.08%之间,平均为0.05%)^[8]。云南个旧典型的变玄武岩铜矿大白岩铜锡矿床黄铜矿中Fe含量平均为30.48%;Cu含量平均33.70%;有害组分As含量为0.18%~0.70%,黄铜矿含有一定量的有益组分Ni、Co、Se^[9]。西藏典型的岩浆热液型铜矿床甲玛铜多金属矿床中黄铜矿的S含量平均为34.954%;Fe含量平均30.543%;Cu含量平均为34.081%^[10]。江浪矿田中黄铜矿有别于其他各类型矿床中的黄铜矿,并以富Fe,贫S为特征。

从黄铜矿中含有的有益有害组分来看,江浪矿田床的黄铜矿普遍含有As、Mo,大部分含有Au、Ag、Se,个别含有Mn、Ga。拉拉铜矿的黄铜矿仅含Co;甲玛铜矿的黄铜矿中所有样品都含有Co,有的含有As、Au、Ag、Se、Zn,少数含有Te、Ni;个旧铜锡矿床的黄铜矿中含有Co、Ni、As,有的含有Se,个别含有Au、Zn。

5.2 伴生金银元素赋存状态

金元素主要以独立金矿物金银矿形式分布在黄铜矿、磁黄铁矿的裂隙中。其次少量以类质同像

表6 银矿物能谱分析结果($\mu\text{g}/\%$)
Table 6 Energy spectrum analyses of the silver-bearing minerals

元素 点号	Te	S	Fe	Cu	Zn	Se	Ag	Au	Bi	Pb	U	总量	银矿物化学式	银矿物或含银矿物
1	-	0.42	0.73	0.86	0.89	-	96.68	-	-	-	-	100.00	Ag _{1.00}	单质银
2	-	0.55	0.90	0.81	1.43	-	95.81	-	-	-	-	100.00	Ag _{1.00}	单质银
3	-	15.49	16.21	3.94	-	-	4.87	-	59.48	-	-	100.00	Ag _{0.73} (Cu _{1.00} Fe _{4.68} S _{6.68} Bi _{4.59} S _{7.79})	含银单质铋
4	1.67	14.89	2.04	2.26	-	0.98	21.12	-	35.88	21.16	-	100.00	Ag _{1.91} (Cu _{0.35} Fe _{0.34} Pb) _{1.71} (Se _{0.12} Te _{0.13} S _{4.3} As _{4.75})	块硫铋铅银矿
5	16.06	-	2.62	2.73	-	0.96	5.07	-	72.56	-	-	100.00	Ag _{1.00} (Cu _{0.91} Fe _{1.00}) _{1.91} Bi _{1.38} (Te _{2.68} Se _{0.26}) _{2.94}	含银叶碲铋矿
6	7.66	-	10.31	7.02	-	-	9.93	-	48.25	-	-	100.00	Ag _{1.00} (Cu _{1.20} Fe _{2.01}) _{3.21} Bi _{2.51} (Te _{0.65} S _{5.70}) _{6.35}	硫铋银矿
7	-	10.77	1.90	2.43	-	6.37	6.62	-	8.69	63.21	-	100.00	Ag _{1.00} (Cu _{0.54} Fe _{0.63} Pb _{4.97}) _{6.15} Bi _{0.68} (Se _{1.32} S _{5.47}) _{6.79}	含银方铅矿
8	1.57	14.85	1.54	1.96	-	0.90	21.19	-	34.63	23.36	-	100.00	Ag _{1.74} (Cu _{0.27} Fe _{0.24} Pb _{1.00}) _{1.51} Bi _{1.47} (Se _{0.10} Te _{0.11} S _{4.11} As _{4.32})	块碲铋铅银矿
9	14.15	-	1.60	1.82	-	-	0.12	-	76.39	6.03	-	100.00	(Cu _{0.26} Fe _{0.26} Pb _{0.26}) _{0.78} Bi _{3.3} Te _{1.00}	含银叶碲铋矿
10	1.42	15.46	0.75	1.02	-	1.35	24.31	-	39.35	16.33	-	100.00	Ag _{2.86} (Cu _{0.30} Fe _{0.17} Pb _{1.00}) _{1.37} Bi _{2.39} (Se _{0.22} Te _{0.14} S _{6.11}) _{6.47}	块碲铋铅银矿
11	36.10	0.89	0.88	1.09	-	-	61.03	-	-	-	-	100.00	Ag _{2.00} Te _{1.00}	碲银矿
12	37.33	-	-	-	-	-	62.67	-	-	-	-	100.00	Ag _{1.99} Te _{1.00}	碲银矿
13	-	14.83	1.45	0.66	4.57	-	41.76	16.44	20.29	-	-	100.00	Ag _{5.54} Au _{1.20} (Cu _{0.15} Fe _{0.37} Zn _{1.00}) _{1.57} Bi _{1.39} S _{6.62}	硫铋金银矿
14	-	14.31	2.95	0.78	5.85	-	36.17	26.20	13.75	-	-	100.00	Ag _{3.74} Au _{1.49} (Cu _{0.59} Fe _{0.14} Zn _{1.00}) _{1.73} Bi _{0.74} S _{4.98}	硫铋金银矿
15	-	14.52	1.23	-	4.46	-	44.19	17.36	18.23	-	-	100.00	Ag _{6.01} Au _{1.29} (Fe _{0.32} Zn _{1.00}) _{1.32} Bi _{1.28} S _{6.65}	硫铋金银矿
16	19.09	13.30	2.21	1.82	-	-	17.58	-	46.00	-	-	100.00	Ag _{1.09} (Fe _{0.26} Cu _{0.29}) _{0.55} Bi _{1.47} Te _{1.00} S _{2.77}	碲铋银矿
17	30.81	5.66	2.40	1.30	-	-	40.91	-	14.65	-	3.28	100.00	Ag _{1.57} (Fe _{0.18} Cu _{0.08}) _{0.26} Bi _{0.29} Te _{1.00} U _{0.06} S _{0.73}	碲银矿
18	39.05	3.17	2.64	2.18	-	-	49.49	-	-	-	3.47	100.00	Ag _{1.50} (Fe _{0.15} Cu _{0.11}) _{0.26} Te _{1.00} U _{0.05} S _{0.32}	碲银矿

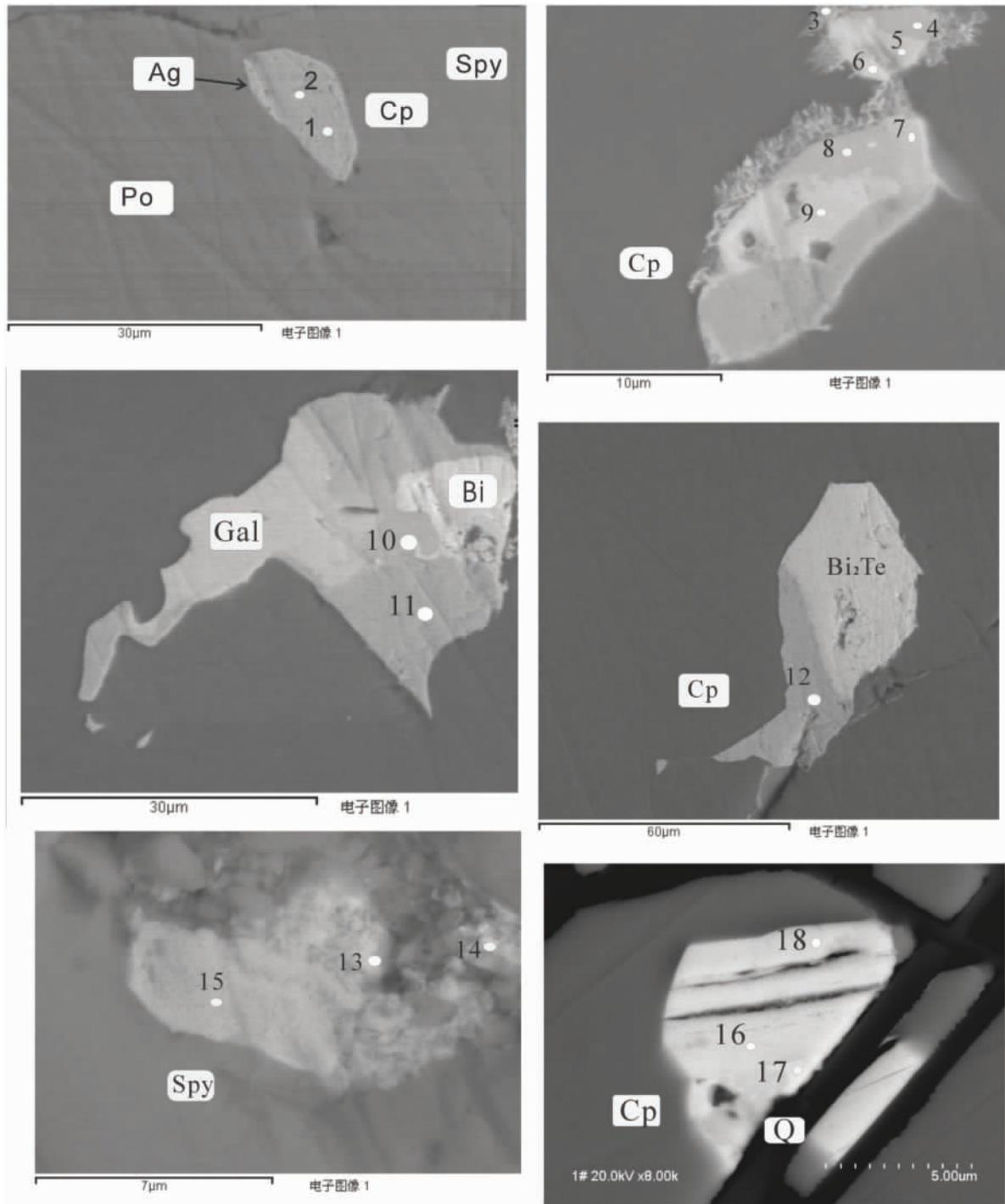


图 10 银矿物背散射电子像

Po. 磁黄铁矿; Cp. 黄铜矿; Spy. 铁闪锌矿; Gal. 方铅矿; Q. 石英; Bi. 铋矿物

Fig. 10 Backscattered electron images for the silver-bearing minerals

Po = pyrrhotite; Cp = chalcopyrite; Gal = galena; Spy = marmatite; Q = quartz; Bi = bismuth-bearing minerals

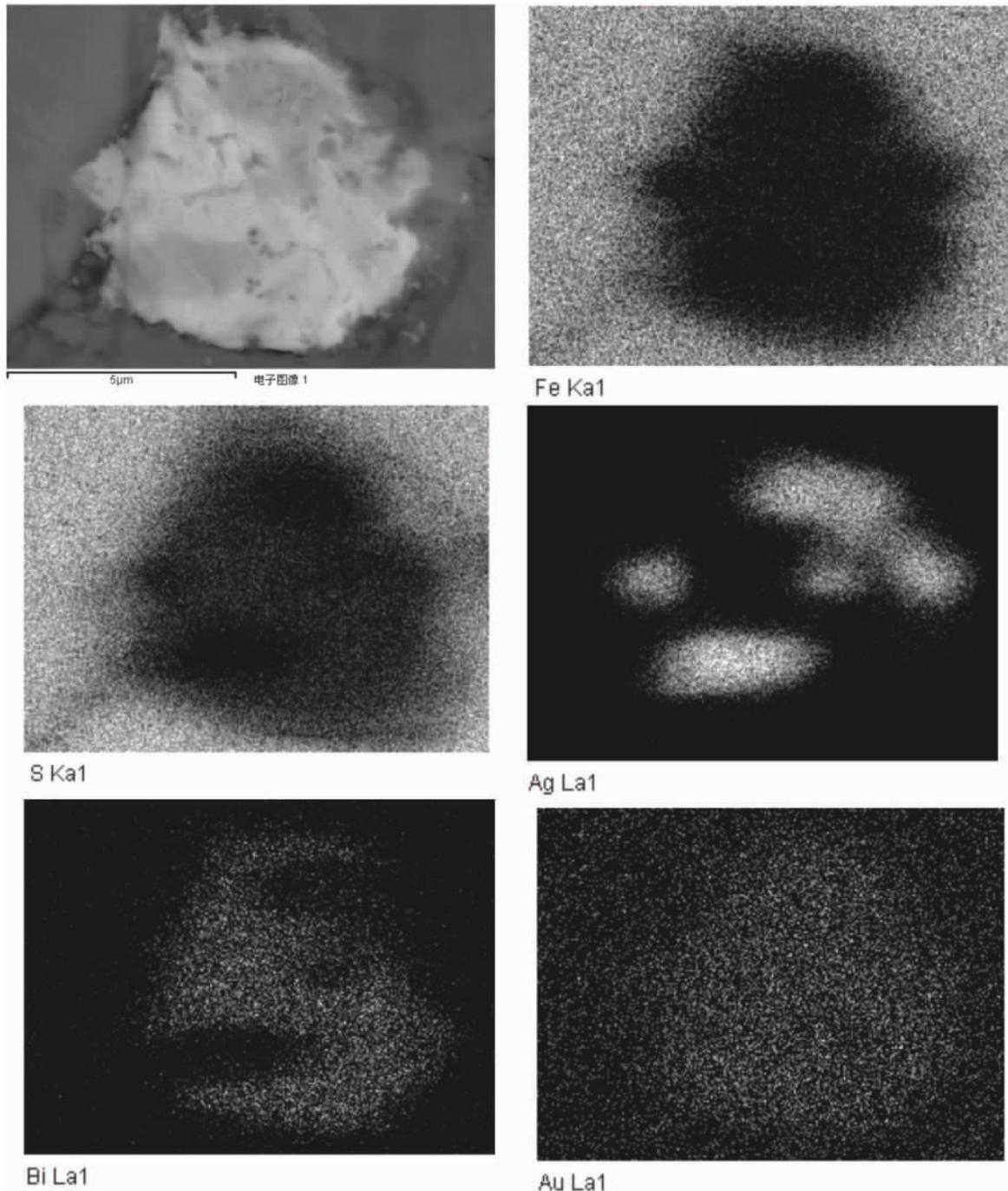


图 11 含银矿物面扫描分析

Fig. 11 Planar scanning images for the silver-bearing minerals

的形式分布在铋矿物和银矿物中。银元素主要以独立银矿物单质银、块硫铋铅银矿、硫铋银矿、块辉铋铅银矿、碲银矿、硫铋金银矿、碲铋银矿、碲银矿的形式存在,这些银矿物主要以包裹体的形式包裹在黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿中。另外也有少量的Ag元素以类质同像的形式分布在铋矿物如单质铋、自然铋、叶碲铋矿中,或以类质同像形式分布在方铅矿中。

5.3 矿石的综合利用建议

里伍矿田中矿石矿物黄铜矿、磁黄铁矿大部分都含有Au、Ag,闪锌矿中含有Ag。铜精矿的化学分析显示,Au的含量为 0.48×10^{-6} ,Ag的含量为 59.07×10^{-6} ,硫精矿中含Au 0.52×10^{-6} ,含Ag 12.60×10^{-6} ,可以考虑其回收利用。对有害元素As,黄铜矿中含量平均0.283%,磁黄铁矿中含量平均0.446%,闪锌矿中含量平均0.076%。因此,在选矿

及冶炼的过程中,应考虑在回收利用 Cu、S、Fe、Zn、Au、Ag 的同时避开有害元素 As。原矿中各伴生元素 Au、Ag 的赋存状态研究较充分,在选矿过程中可综合考虑利于有益元素回收、有害元素不污染环境的选矿方案及尾矿处理方案。该研究成果不仅为矿产资源的选矿、合理充分利用、资源和金融安全、环境保护等可持续发展提供有价值的参考资料,同时也为成岩-成矿作用提供可资借鉴的信息。

参考文献:

- [1] 李建忠,汪名杰,姚鹏等. 四川九龙黑牛洞铜矿床地质特征及其外围找矿方向初探[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(4): 69-77.
- [2] 冯孝良,刘严松,张惠华等. 四川九龙江浪矿田包裹体研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2008, 28(2): 1-11.
- [3] 姚鹏,汪名杰,李建忠等. 里伍式富铜矿床同位素示踪及其成矿地质意义[J]. 地球学报, 2008, 29(16): 691-696.
- [4] 李胜荣,许虹,申俊峰,李国武等. 结晶学与矿物学[M]. 北京:地质出版社, 2008. 17-27.
- [5] 王濮,潘兆橧,翁玲宝. 系统矿物学(上册)[M]. 北京:地质出版社, 1982. 260-288.
- [6] LI ZE QIN, HU RUI ZHONG, WANG JIANG ZHEN et al. Lala Fe-oxide-Cu-Au-U-REE ore deposit, Sichuan China—An example of Superimposed mineralization[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2002, 21(4): 258-260.
- [7] GREENTREE M R. Tectonstratigraphic analysis of the Proterozoic Kangdian iron oxide copper province, Southwest China [D]. Ph. D. Thesis, University of Western Australia, 2007. 1-284.
- [8] 朱志敏,曾令熙,周家云,罗丽萍,陈家彪,沈冰. 四川拉拉铁氧化物铜金矿床(IOCG) 形成的矿相学证据[J]. 高校地质学报, 2009, 15(4): 485-495.
- [9] 魏宁,方维萱,陈家玮,张海,甘凤伟. 云南个旧大白岩铜锡矿床铜锡与共生组分赋存状态研究[J]. 矿物学报, 2010, 30(1): 116-122.
- [10] 王焕,唐菊兴,应立娟,王立强,秦志鹏. 西藏甲玛铜多金属矿床主要矿石矿物特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(1): 103-112.

The occurrence of the major metallogenic elements and accompanying gold and silver from the Jianglang orefield, western Sichuan

DAI Jie, XU Jin-sha, PAN Xiao-dong, ZHANG Qian, WANG Kun-yang
(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The examination of the occurrence of the major metallogenic elements such as Cu, Zn, Fe and S and accompanying elements such as Au and Ag from the Liwu, Heiniudong, Wajingou, Sunyelin and Zhongzui deposits in the Jianglang orefield, western Sichuan is based on the in-situ analytical techniques including scanning electron microscopy (SEM), backscattered electron images, X-ray linear and planar scanning, energy dispersive spectrometry (EDS) and microprobe analysis. These analytical results may provide valuable information for ore dressing, rational utilization, resources and financial security, environmental protection, sustainable development, diagenesis and mineralization of mineral resources.

Key words: Jianglang orefield; major metallogenic element; accompanying Au and Ag; occurrence