

文章编号: 1009-3850(2008)02-0001-11

四川九龙县里伍铜矿包裹体研究

冯孝良^{1,2}, 刘俨松¹ 张惠华², 吴政波², 李同柱²

(1. 成都理工大学 地球科学院, 四川 成都 610059, 2. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘要: 成矿物质来源是矿床研究的重要内容。本文通过里伍铜矿含矿岩石中的石英流体包裹体的温度、成分和盐度测试分析, 以及矿床地球化学特征研究, 结合区域地质演化历史, 揭示其成矿物质来源、成矿物质的运移和浓集机制, 为解释里伍铜矿的成矿环境和成因提供依据。

关键词: 里伍铜矿; 包裹体; 成矿流体

中图分类号: P618.41

文献标识码: A

1 区域地质背景及矿床地质特征

1.1 区域地质背景

里伍铜矿位于扬子地台西缘, 行政区划属甘孜藏族自治州九龙县魁多乡、烟袋乡。区域构造上处于康滇地轴西侧, 松潘甘孜造山带东南缘, 北东向(木里-锦屏)弧形推覆构造带北西侧后缘, 主要由从北向南推覆的木里-锦屏山弧形推覆构造带及其北西侧后缘拆离出露的一系列由变质核杂岩穹隆体所形成的穹隆链组成^[1,2]。该穹隆链与区域铜、金、多金属成矿关系密切, 为重要的区域控矿构造。里伍铜矿为一个中型富铜锌多金属矿床, 铜矿石平均品位为 2.5%, 已获得铜储量 26 万吨。

矿区出露一套中浅变质地层, 主要为前震旦系里伍群(P₁^l)、下志留统甲坝岩组(S₁^j)、石炭系乌拉溪岩组(C₁^w)。其中, 前震旦系里伍群是里伍铜矿床的含矿岩层。里伍群岩性以云母片岩、云母石英片岩、石英片岩为主, 夹斜长角闪岩及变基性岩, 原岩主要为一套含火山凝灰质的海相砂、泥质浊流沉积岩。

1.2 矿床地质特征

1. 含矿建造

里伍铜矿床位于江浪穹隆构造的东南翼近轴部倾没部位, 含矿岩层属里伍群下段中岩带中上部, 以云母片岩、云母石英片岩、石英片岩为主, 夹斜长角闪岩及变基性岩, 为一套强烈变形变质的核杂岩。里伍群下段中岩带进一步可细分为 8 层, 其中第 4、5 层为下部矿体含矿岩层, 岩性为含黑云绢云片岩、绢云石英岩、绿泥绢云片岩、绢云片岩夹绢云石英片岩、片状黑云绢云石英岩及绢云石英岩^[3]; 第 6 层为上部矿体(A-B)的主要含矿岩层, 岩性为片状含黑云绢云石英岩、片状绢云石英岩、片状含石榴子石绿泥绢云石英岩夹含石榴子石绿泥绢云石英片岩、黑云绢云片岩及褪色石英岩, 由于矿化蚀变强烈, 岩石褪色现象明显。

2 矿体空间分布特征

里伍铜矿床各矿体均产于含矿蚀变带内, 其空间分布与矿化蚀变带关系密切, 矿体受江浪穹隆核部里伍群堆垛层控制^[4]。总体上, 矿体产状与围岩片理基本一致, 局部呈小角度斜交, 沿走向和倾向矿体“穿层”现象明显, 矿体在矿化蚀变带中的位置取决于容矿构造和热液蚀变发育情况。江浪穹隆成矿过程形成的脆性断裂带、顺层滑脱剪切片理带是良好的容矿空间, 矿体在蚀变带中成群成带产出^[5]。

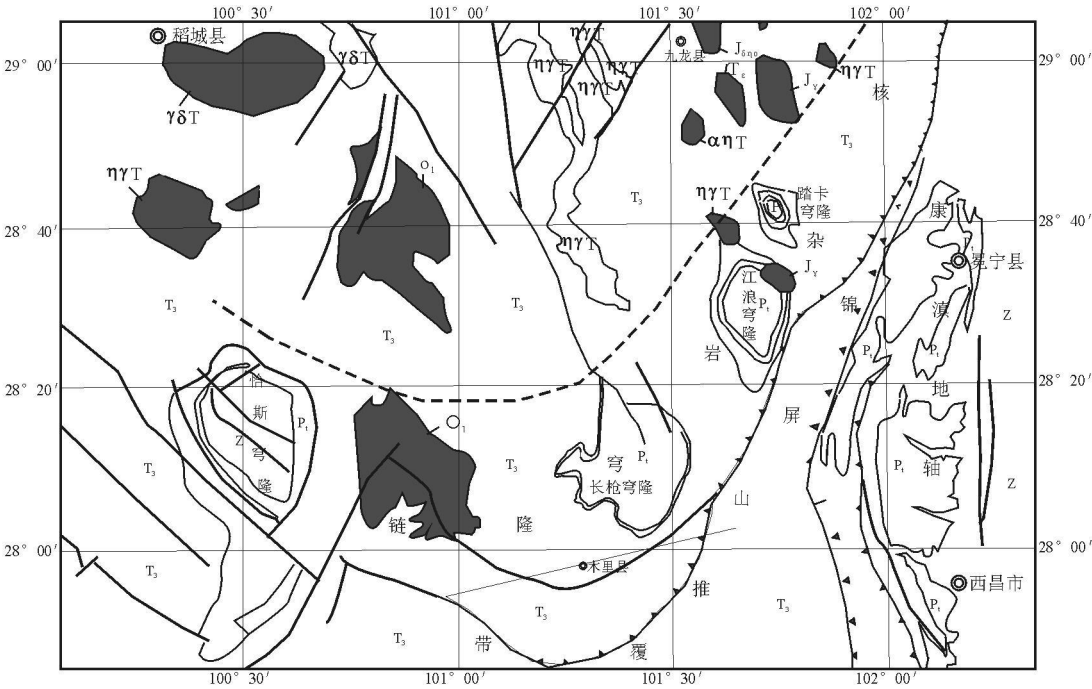


图 1 四川省九龙县里伍铜矿区域地质简图

Fig 1 Simplified geological map of the Liwu copper deposit in Jiulong, Sichuan

矿区位于江浪穹隆南西,目前已经勘探出 28个工业矿体,矿体主要为似层状和不规则的大透镜状,其次为叠瓦状和分枝复合状。矿体产于次级褶皱冲断层带及其分支破碎带内,其产状受 S₃片理控制明显,矿体与 S₃片理大致和谐产出,矿体总体倾向南东。矿体规模大小不等,长度在十米至四、五百米,矿体厚度一般为 1~3m,变化范围为 0.21~17.43m,全矿区矿体厚度平均为 2.43m,小于平均厚度者占 50%。矿体的厚度变化系数在 40%~109%之间,多数主矿体变化系数小于 80%,属于较稳定型。

3 矿化与蚀变特征

里伍铜矿床蚀变带多发育于里伍群中上部,具有“褪色”蚀变现象。热液蚀变类型主要为黑云母化、绢云母化、硅化,并在部分地段发育绿泥石化、斜长石化、石榴子石化和电气石化。蚀变作用经历了早期黑云母化、斜长石化,中期电气石化、硅化到晚期绢云母化和绿泥石化的演变,成矿与中晚期蚀变作用关系密切,成为重要的找矿标志。里伍矿区各矿体均产于含矿蚀变带内,其空间分布特征与矿化蚀变带关系密切。

矿区矿化类型以磁黄铁矿化为主,次为黄铜矿化、闪锌矿化,偶见黄铁矿化及方铅矿化。通常在褪色蚀变带中叠加黄铜矿化和斜长石化及绿泥石化,则形成工业矿体,而在褪色蚀变带中仅有磁黄铁矿化者一般无工业矿体产出。当蚀变带中蚀变类型

多,蚀变强烈,则常有黄铜矿化(部分地段为闪锌矿化),并出现工业铜矿体^[6]。

4 矿石组构特征

里伍铜矿床矿石构造主要有块状、角砾状、条带状、浸染状等,其中以浸染状矿石为主,浸染状矿石常常分布在致密块状矿石上下盘或角砾状矿石与富矿体周围,具有熔蚀现象,矿石内硫化物大多沿 S₃片理分布,部分有斜交片理的特征。单独产出的浸染状矿石常与围岩呈渐变过渡关系,硫化物对脉石矿物熔蚀现象不明显,矿物生成先后关系不明确,推测为岩浆的熔离分解作用形成。

里伍铜锌矿床及外围各矿床(点)的矿石结构构造大同小异,总体上比较简单。矿石结构主要有自形晶结构、半自形它形粒状结构、包含结构、共边结构、交代浸蚀结构、交代残余结构、蠕虫状结构、乳浊状结构、叶片状结构、重结晶结构等,具有典型的热液充填交代成因的矿石结构特征。

2 包裹体氢、氧同位素特征

结合前人的研究资料,笔者对里伍铜矿,以及外围的柏香林、挖金沟、黑牛洞的含矿石英中的包裹体进行氢、氧同位素组成进行分析(表 1)。通过野外观察,所选的含矿石英与铜矿有直接的成因联系,与矿床形成同期。

通过对含矿石英中的包裹体进行测定,获得其

表 1 里伍矿区含石英英包裹体氢、氧同位素组成
Table 1 Hydrogen and oxygen isotope compositions in the ore bearing quartz inclusions from the Liwu copper deposit in Jiulong, Sichuan

序号	采集地	测试矿物	$\delta^8\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	备注
1	里伍	石英	-5.06	-75.2	本文
2	里伍	石英	13.93	-98.3	
3	里伍	石英	1.38	-68.1	
4	里伍	石英	0.78	-72.5	
5	里伍	石英	-0.92	-77.6	
6	里伍	石英	-2.99	-77.9	
7	挖金沟	石英	-6.01	-64.4	
8	挖金沟	石英	-5.94	-64.1	
9	挖金沟	石英	3.77	-71.9	
10	黑牛洞	石英	0	-76.6	
11	柏香林	石英	-8.79	-77.3	宋铁和 (1990)
12	里伍	石英	5.44	-69.18	
13	里伍	石英	4.69	-70.25	
14	里伍	石英	5.13	5.13	
15	里伍	石英	1.42	1.42	
16	里伍	石英	2.51	2.51	

表 2 不同类型水、岩石的 $\delta^8\text{O}$ 和 δD 值对比表
Table 2 Comparison of the $\delta^8\text{O}$ and δD values for different types of water and rocks

自然界类型	$\delta^8\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$
原生水	-13~9	0~-140
岩浆水	6~9	-40~-80
变质水	5~25	-20~-65
海水	-0.5~0.3	0(平均)
大气降水(雨水)	50~10	50~-350
地下受热水	-16~3	25~-120
火山岩、深成岩石	5.5~10	-50~-90
海相碳酸岩	22~30	
淡水碳酸岩	18~25	

(据卢武长主编《稳定同位素地球化学》(1986)及宜昌所《同位素地质采样要求》(1982)综合整理)

$\delta^8\text{O}$ 值为 $-8.79\text{‰} \sim 13.93\text{‰}$, 平均值为 0.58‰ , δD 的值为 $-64.10\text{‰} \sim -98.30\text{‰}$, 平均为 -59.64‰

在 $\delta^8\text{O}-\delta\text{D}$ 图(图 2)上, 14号点落在变质水范围内, 其余各点均落在岩浆水、变质水与大气降水之间表明成矿溶液可能来自于岩浆水和变质水, 并在

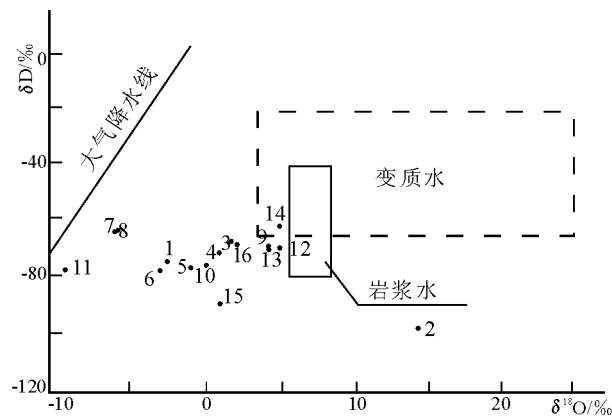


图 2 里伍铜矿床 $\delta^8\text{O}-\delta\text{D}$ 图
Fig 2 $\delta^8\text{O}-\delta\text{D}$ diagram of the Liwu copper deposit in Jiulong, Sichuan

后期有较多的大气降水的混入。

对上述样品进行包裹体的成分分析(表 3)发现, 包裹体成分可以划分为 $\text{Na}^+-\text{Ca}^{2+}-\text{Cl}^- (\text{F}^-)$ 和 $\text{Na}^+-\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}$ 和两种类型。综合上述分析, 含矿溶液为一开放的系统, 其原始成分为岩浆水、变质水, 但受成矿环境和后期构造等因素影响, 海水和大气降水混入了原始含矿溶液, 从而改变了含矿溶液中氢、氧同位素的含量变化。

3 硫同位素组成

硫化物的硫同位素组成可示踪硫的来源和成矿过程^[7]。吴键民等(1998)指出里伍矿区硫同位素组成变化范围小, 矿石的 $\delta^34\text{S}$ 值为 $2.5\text{‰} \sim 7.8\text{‰}$, 峰值集中在 $5\text{‰} \sim 7\text{‰}$ 之间, $\delta^34\text{S}$ 富集明显, 呈单塔式分布(图 3)。宋鸿林等(1995)对里伍矿区 5 件硫化物的硫同位素进行测定(表 4)后指出, 里伍矿区不同金属硫化物的 $\delta^34\text{S}$ 值十分相似(图 4), 离差较少, 属重硫型, $\delta^34\text{S}$ 变化范围为 $2\text{‰} \sim +8.7\text{‰}$ 与 $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ 值变化范围基本一致。

结合对金属矿物生成顺序分析, 笔者认为不同金属硫化物 $\delta^34\text{S}$ 值与 $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ 值接近, 应为成矿后期变质的均一化作用的结果, 而非金属硫化物同期形成的原因。

围岩中矿物(以黄铁矿为主)硫同位素测定值 $\delta^34\text{S}$ 为 $-1.2\text{‰} \sim 7.63\text{‰}$ (宋鸿林, 1995), 与铜矿石中的 $\delta^34\text{S}$ 值十分相似(图 5 图 6), 表明矿石和围岩中的硫具相同硫源, 矿石中的硫来自围岩。

表 3 含矿石英包裹体成分测试表
Table 3 Compositional analyses for the ore-bearing quartz inclusions from the Liwu copper deposit in Jiulong, Sichuan

样品编号	矿物名称	爆裂温度 /℃	气相成份/10 ⁻⁶						液相成份/10 ⁻⁶								本文	
			H ₂ O	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Li	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻		pH
JLLW01	石英	100 ~ 600	471.85	187.25	0.50	0.07	0.22	0.84	12.07	0.61	0.029	0.005	0.11	16.78	0.00	0.00	6.80	本文
JLLW16	石英	100 ~ 600	201.55	112.30	0.05	0.04	0.17	0.30	0.44	0.36	0.005	0.005	0.09	1.55	0.00	0.00	6.60	
JLLW17	石英	100 ~ 600	325.33	172.55	0.25	0.03	0.18	0.10	5.31	0.14	0.019	0.010	0.05	6.90	0.00	0.00	6.60	
JLLW18	石英	100 ~ 600	318.25	158.65	0.25	0.04	0.16	0.18	3.23	0.84	0.005	0.005	0.08	5.01	0.05	0.00	6.60	
JLLW19	石英	100 ~ 600	444.32	136.58	0.50	0.03	0.15	0.09	6.34	0.05	0.038	0.005	0.00	7.65	0.05	0.00	6.60	
JLLW21	石英	100 ~ 600	402.31	172.25	0.50	0.03	0.15	1.08	5.33	0.32	0.534	0.010	0.07	7.02	2.50	0.00	6.60	
JLWJC03	石英	100 ~ 600	426.97	188.63	0.50	0.03	0.16	1.85	5.95	0.03	0.079	0.005	0.00	7.21	0.05	0.00	6.70	
JLWJC06	石英	100 ~ 600	389.58	101.25	0.05	0.03	0.17	0.37	0.63	0.72	0.004	0.005	0.05	1.25	0.00	0.00	6.60	
JLHND01	石英	100 ~ 600	333.55	171.56	0.25	0.02	0.11	0.33	1.24	0.05	0.001	0.005	0.00	2.58	0.00	0.00	6.60	
JLBXL02	石英	100 ~ 600	488.63	381.55	0.55	0.06	0.24	2.36	9.84	0.09	0.050	0.005	0.06	14.88	0.05	0.00	6.80	
LB6	石英	130 ~ 650	666.70	341.50	0.00	46.88	0.50	0.66	2.52	0.28	0.35	0.01	0.07	2.80	0.00	0.00	6.80	宋鸿林 (1995)
LB9	石英	130 ~ 650	600.00	49.35	0.00	18.42	0.06	0.25	0.13	0.43	0.14	0.01	0.00	1.90	0.00	0.00	6.60	
LB14	石英	130 ~ 650	233.30	76.38	0.00	4.44	0.06	0.33	0.52	0.32	0.31	0.01	0.02	1.90	0.00	0.00	6.60	
LB18	石英	130 ~ 650	400.00	162.70	0.00	10.00	0.01	0.29	0.70	0.36	0.08	0.01	0.00	0.60	0.00	0.00	6.50	
LB20	石英	130 ~ 650	433.30	234.00	0.00	10.00	0.06	0.54	2.56	0.21	0.12	0.01	0.04	2.30	2.50	0.00	6.70	
LB26	石英	130 ~ 650	466.70	124.50	0.00	38.94	0.06	0.33	0.67	0.28	0.07	0.01	0.00	0.90	0.00	0.00	6.60	

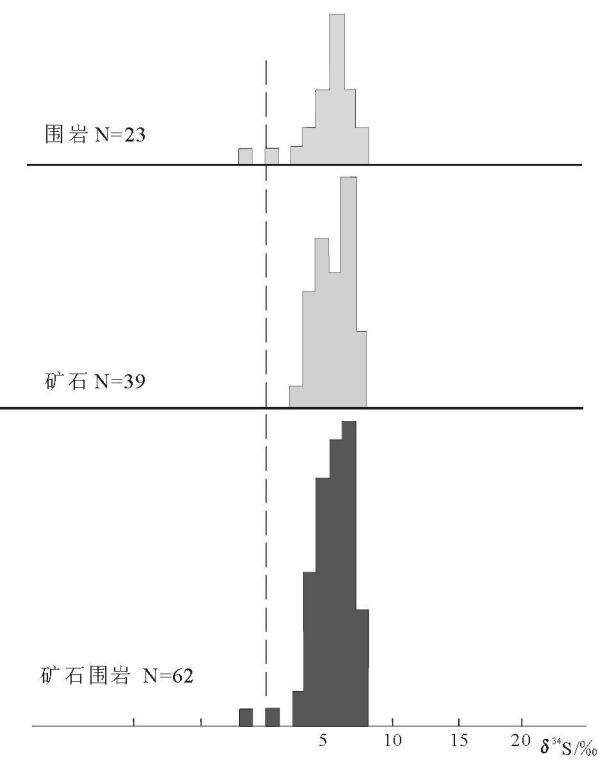


图 3 里伍铜矿硫同位素直方图 (据吴键民等, 1998)
Fig 3 Histogram of the sulfur isotopic compositions in the metallic sulfides from the Liwu copper deposit in Jiulong Sichuan (afterWu Jianmin et al., 1998)

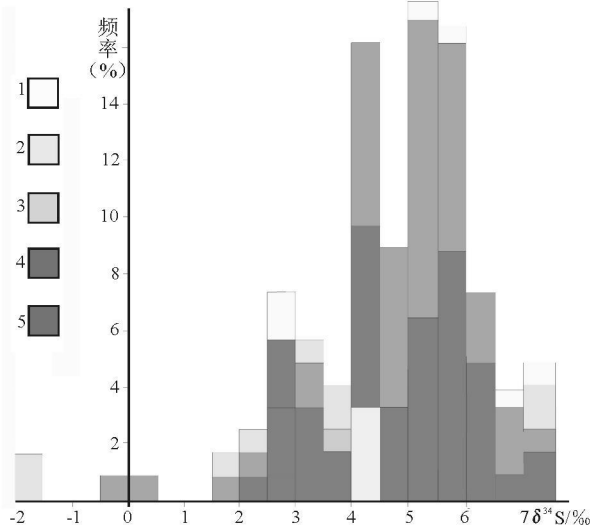


图 4 里伍铜矿硫同位素直方图 (据宋鸿林, 1995)
1 黄铁矿; 2 方铅矿; 3. 闪锌矿; 4 磁黄铁矿; 5 黄铜矿
Fig 4 Histogram of the sulfur isotope in the metallic sulfides from the Liwu copper deposit in Jiulong Sichuan (after Song Honglin, 1995)
1= Pyrite 2= Galena 3= sphalerite 4= pyrrhotite 5= chalcopyrite

表 4 里伍矿区硫化物共生矿物对的硫同位素分析结果表 (据宋鸿林, 1995)

Table 4 Sulfur isotopic analyses of the paragenetic mineral pairs in the metallic sulfides from the Liwu copper deposit in Jiulong Sichuan (after Song Honglin, 1995)

样品名称	黄铜矿	磁黄铁矿	黄铜矿	磁黄铁矿	铁闪锌矿
$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	8.73	5.80	6.01	5.58	6.62

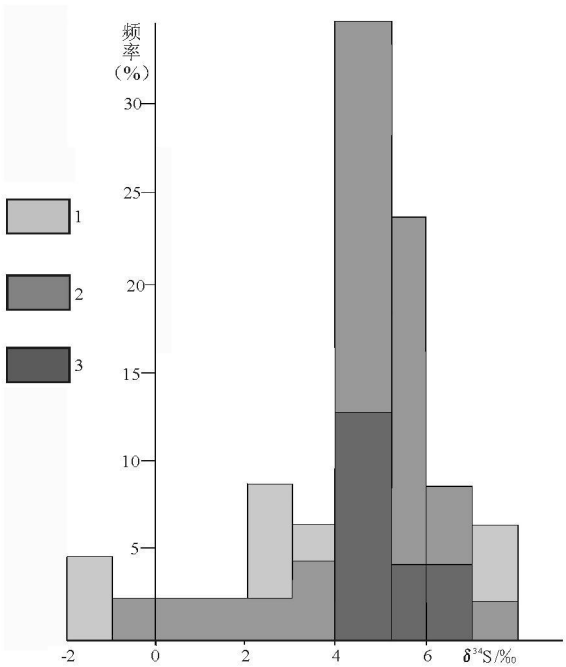


图 5 矿石硫同位素组成直方图
1 闪锌矿; 2 磁黄铁矿; 3 黄铜矿

Fig 5 Histogram of the sulfur isotopic compositions in the country rocks from the Liwu copper deposit in Jiulong Sichuan

1= sphalerite 2= pyrrhotite 3= chalcopyrite

4 成矿流体特征及物理化学条件

作为成矿物质载体的成矿流体,在成矿系统中随物理化学条件的改变而不断发展演化,并在适当的部位与围岩反应而沉淀出矿质,使成矿物质大量聚集而形成矿体。因此,研究成矿流体的特征及其性质有助于了解矿床成因及其形成机理。

4.1 成矿流体包裹体形态与分布特征

对里伍、柏香林、中咀、黑牛洞、挖金沟的含矿石英包裹体进行测试分析,获得含石英包裹体特征 (表 5)。

表 5 里伍铜矿及外围铜矿床(点)含石英英气液相包裹体特征测试结果一览表
Table 5 Characteristics of the ore-bearing gas-fluid quartz inclusions in the Liwu copper deposit and its surrounding copper deposits

样品编号	包裹体类型	包裹体特征						
		形 状	大小/ μm	气液比/%	颜 色	分 布	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	爆裂温度/ $^{\circ}\text{C}$
JLLW1	两相气液体水	近方形为主,次为近三角形、负晶形	9~15	12% $\pm$	无色	随机	246	176~255
	含 CO_2 三相水	近椭圆、近方形	6~9	10% $\pm$	无色	随机	344	272
JLLW3	两相气液体水	近方形为主,其次为近椭圆形	9~15	5%~50%	无色	星点状	151~228	193~208
JLLW4	两相气液体水	主要为长条形和近椭圆形	6~15	5% $\pm$	无色	星点状	136~194	—
JLLW17	两相气液体水	近椭圆为主,其次为近方形	4~18	5% $\pm$	无色	星点状	146~206	118
JLLW18	两相气液体水	近方形为主,见负晶形	6~20	5%~15%	无色	星点状	182~203	206
JLLW191	两相气液体水	近方形、椭圆形	6~12	5%~15%	无色	星点状	178~317	—
	含 CO_2 三相水	近方形	6~15	5% $\pm$	无色	星点状	317	384
JLLW20	两相气液体水	近方形为主,次为不规则形	6~25	5% $\pm$	无色	星点状	176~246	—
JLLW21	含 CO_2 三相水	近椭圆形、近矩形	12~20	12%~25%	气相棕色,液相无色	星点状	—	253~350
	两相气液体水	三角形、近菱形、椭圆形	6~9	5%~10%	无色	星点状	234~309	—
HND2	两相气液体水	近椭圆形、长条形为主,其余不规则	4~20	5%~60%	无色	孤立状	166~246	—
JLWJG1	两相气液体水	近椭圆形、椭圆形	4~12	5%	无色	星点状	193~268	—
JLWJG3	两相气液体水	近椭圆形、椭圆形,不规则状	5~10	5%~10%	无色	随机	199~264	259~285
JLWJG4	两相气液体水	矩形、近矩形为主,次为近椭圆形	5	5%	无色	星点状	235~294	—
JLWJG5	两相气液体水	长条形为主,次为不规则形	6~20	5%	无色	星点状	135~238	—
JLWJG6	单项水溶液	米粒状、椭圆形	0.1~15 无色	—	成群成带	—	—	—
	两相气液体水	椭圆形、长条形	6~20	5%~15%	无色	成群成带	194	—
	含 CO_2 三相水	近椭圆	12	10%	无色	星点状	235	—

	两相气液体水	近椭圆	6	5%	无色	零星状	150	—
JL222	两相气液体水	以长条形为主,次为近椭圆形、三角形	5~15	5%~25%	无色	星点状	146~183	—
BX102	两相气液体水	菱形、近椭圆形、纺锤形	5~15	5%~15%	无色	星点状	141~199	—
JLHND1	两相气液体水	椭圆形、近椭圆形	6~12	5%	无色	孤立状	131~161	—
JLZZ1	两相气液体水	椭圆形、近椭圆形、菱形	3~18	5%~10%	无色	星散状	146~189	215
JLBXL1	单项水溶液	以米粒状、不规则状为主,次为椭圆形	0.1~20 无色	—	成群成带	—	—	—
LB6	两相气液体水	椭圆形和负晶形为主,次为不规则状	6~25	15%~20%	无色	成群成带	135~175	—
	含 CO ₂ 三相水	半自形负晶形、椭圆形和不规则形	10~25	60%~65%	气相棕色,液相无色	成群成带	295~315	—
LB9	单项水溶液	以米粒状为主,次为不规则状	10~25	— 无色	星散状	—	—	—
	两相气液体水	椭圆形和负晶形为主,次为长条形	5~20	65%±	无色	成群成带	165~215	—
	含 CO ₂ 三相水	以圆形、椭圆形为主,次为负晶形	10~20	15%±	气相棕色,液相无色	自由分布	255~315	—
LB14	单项水溶液	以米粒状、规则状为主,次为椭圆形	0.1~15		无色	成群成带	—	—
	两相气液体水	以椭圆形为主,次为不规则形、负晶形	6~15	10%~25%	无色	成群成带	155~245	—
	CO ₂ 两相汽液	以负晶形为主,次为椭圆形和近椭圆形	10±	10%±	气相棕色,液相无色	成群成带	—	—
	含 CO ₂ 三相水	以椭圆形、负晶形为主,次为不规则状	10±	15%~20%	气相棕色,液相无色	自由分布	295~315	—
LB18	单项水溶液	米粒状、不规则状	0.1~10		无色	自由分布	—	—
	两相气液体水	以椭圆形、不规则形为主,次为负晶形	5~15	15%~20%	无色	成群成带	165~215	—
	含 CO ₂ 三相水	负晶形、椭圆形、近椭圆形	10~15	15%±	气相棕色,液相无色	自由分布	265~305	—
LB20	单项水溶液	米粒状、不规则状	0.1~15	20%±	无色	成群成带	—	—
	两相气液体水	椭圆形,次为圆形、负晶形	5~20	10%~15%	无色	成群成带	155~215	—
	含 CO ₂ 三相水	椭圆形、不规则形	10~15	65%±	气相棕色,液相无色	成群成带	265~305	—
LB26	单项水溶液	米粒状、不规则状	0.1~15	—	无色	成群成带	—	—
	两相气液体水	椭圆形、半自形负晶形	0~20	69%±	无色	成群成带	—	—
	含 CO ₂ 三相水	椭圆形、半自形负晶形	10~15	50%±	气相棕色,液相无色	自由分布	265~295	—

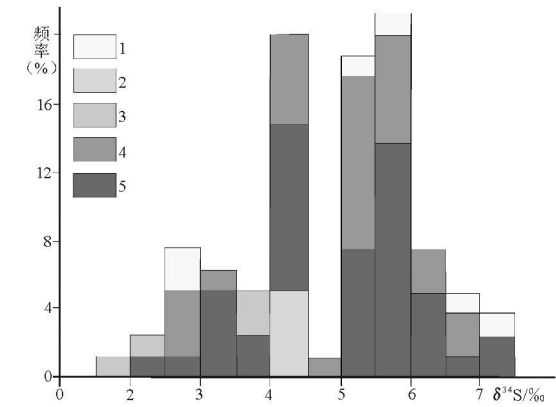


图 6 矿石硫同位素直方图

1 黄铁矿; 2 方铅矿; 3 闪锌矿; 4 磁黄铁矿; 5 黄铜矿
Fig 6 Histogram of the sulfur isotope in the ores from the Liwu copper deposit in Jiulong, Sichuan
1 = Pyrite 2 = Galena 3 = Sphalerite 4 = Pyrrhotite
5 = Chalcopyrite

研究区内含矿石英气相包裹体具有多种类型,可分为单相水溶液、两相气液水、CO₂ 两相气液和含 CO₂ 三相水 4 种类型,其中以两相气液水包裹体为主,其次为含 CO₂ 三相水包裹体、单相水溶液包裹体和 CO₂ 两相气液包裹体。除气液相包裹体外,石英包裹体中偶见含子矿物气液固三相包裹体 (NaCl 晶体) 和黑色有机质包裹体。气液相包裹体中的气液比多为 5% ~ 25%, 少量气液比高达 69%。包裹体数量较多、大小不一、形态多样。具体而言,里伍及其外围矿区的含矿石英包裹体形态以椭圆形、近椭圆形、长条形和不规则形为主,次为近方形、三角形、纺锤形和负晶形,少量包裹体中见石英半自形负晶形。各矿区石英包裹体形态特征无明显区别,而包裹体数量则以里伍和黑牛洞矿区相对较多,柏香林矿区的包裹体相对较少。

包裹体大小变化相对均匀,主要为 5 ~ 15 μm, 次为 15 ~ 25 μm 之间。包裹体主要为星散状分布, 次为随机自由或孤立状分布, 部分包裹体沿沿微裂隙成群成带分布。

石英气相包裹体主要为无色,在含 CO₂ 三相水包裹体中可见气相为棕色,而液相为无色,气液接触界线清晰。

4.2 成矿流体的成分特征

流体包裹体是成矿流体的物质记录,分析成矿流体包裹体中液相及气相的成分可以帮助我们了解成矿流体的组成。

结合前人的研究成果,对包裹体成分 (表 3) 进行分析,并获得包裹体成分参数值 (表 6)。

包裹体成分数据及参数表明,大部分样品包裹体成分中 $Na^+ / K^+ > 1$, $Ca^{2+} / Mg^{2+} > 1$, $F^- / Cl^- < 1$, $SO_4^{2-} / Cl^- < 1$ 。其中,因大部分样品中包裹体中贫 F 及 SO₄, F^- / Cl^- 值与 SO_4^{2-} / Cl^- 值接近于零。在气相上包裹体中,显示出富 CO₂ 气体的特征。包裹体的 PH 值显示弱碱性的特点,PH 值的变化范围为 6.5 ~ 6.8。

在阳离子三角图上 (图 7),包裹体成分显示出富 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 、贫 Na^+ 和 K^+ 的特征;阴离子三角图上,包裹体成分显示出富 SO_4^{2-} 的特征。

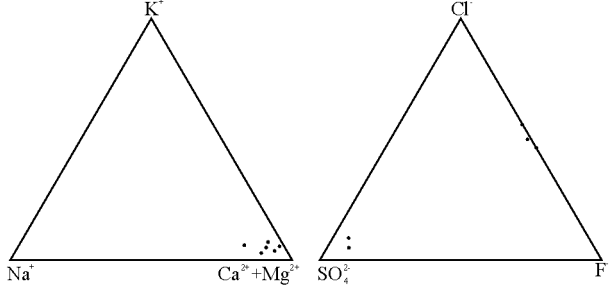


图 7 里伍铜矿包裹体成分阴阳离子三角图

Fig 7 Triangular diagrams for the cations and anions in the inclusions from the Liwu copper deposit in Jiulong, Sichuan

进一步分析表明,里伍铜矿与其外围地区铜矿床 (点) 所获得的包裹体成分比较稳定,包裹体成分变化比较集中。包裹体成分总体可以划分为 $Na^+ - Ca^{2+} - Cl^- (F^-)$ 和 $Na^+ - Ca^{2+} - SO_4^{2-}$ 两种类型,包裹体主要成分为 $Na^+ - Ca^{2+} - Cl^- (F^-)$ 类型,反映了成矿热液来源于深部热卤水及海水等的多源特征。结合区域地质演化史推测,早期成矿流体与富 Na^+ 质的海相火山岩、深部热卤水密切相关,在晚期的热液变质阶段,成矿热液由于海水等的混入而改变了深部热卤水的原有组成成分。

4.3 成矿流体的温度

对里伍铜矿含矿石英包裹体分别进行均一法和爆裂法测温,获得石英包裹体的均一温度和爆裂温度值。从统计结果看,石英包裹体的均一温度范围为 131℃ ~ 344℃, 平均为 202℃。对含矿石英包裹体均一温度值可进一步划分为 131℃ ~ 170℃, 174℃ ~ 211℃ 和 222℃ ~ 344℃ 3 个温度段 (图 8)。

同时测得含矿石英包裹体的爆裂温度变化范围为 118℃ ~ 384℃, 平均为 240℃。平均爆裂温度较平均均一温度值大,代表了均一温度的上限。宋铁和 (1990) 测得里伍矿区包裹体爆裂温度的变化范围为 176℃ ~ 367℃, 平均为 307℃, 并据此指出里伍铜锌矿变质程度较深。宋鸿林等 (1995) 对里伍矿区

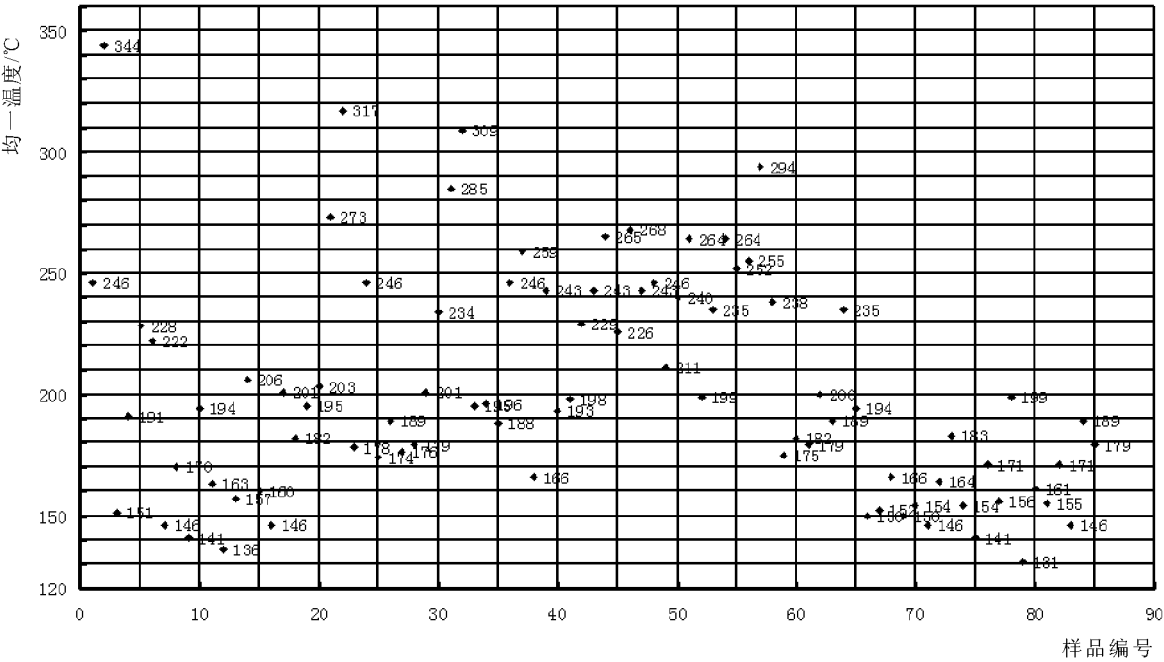


图 8 里伍铜矿含矿石英包裹体均一温度统计图

Fig 8 Statistics of the homogenization temperatures of the ore bearing quartz inclusions in the Liwu copper deposit Jiu long Sichuan

表 6 包裹体成分分析参数表

Table 6 Compositional parameters for the inclusions from the Liwu copper deposit in Jiu long Sichuan

样品编号	矿物名称	包裹体成分参数值			
		Na ⁺ / K ⁺	Ca ⁺ / Mg ⁺	F ⁻ / Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ / Cl ⁻
JLW01	石英	14.37	21.03	0.007	0
JLW16	石英	1.47	72.00	0.058	0
JLW17	石英	53.10	7.37	0.007	0
JLW18	石英	17.94	168.00	0.016	0.10
JLW19	石英	70.44	1.32	0	0.006
JLW21	石英	4.94	0.60	0.010	0.356
JLWJG03	石英	3.22	0.38	0	0.007
JLWJG06	石英	1.70	180.00	0.040	0
JLHND01	石英	3.76	5.08	0	0
JLBXL02	石英	4.17	1.80	0.004	0.003
LB6	石英	3.82	0.80	0.025	0
LB9	石英	0.52	3.07	0	0
LB14	石英	0.63	1.03	0.011	0
LB18	石英	2.41	4.50	0	0
LB20	石英	6.4	1.75	0.017	1.087
LB26	石英	2.03	4.00	0	0

的矿石硫化物进行爆裂法测温(表 7), 获得包裹体爆裂温度变化范围为 135℃ ~ 490℃, 并进一步划分成 135℃ ~ 270℃ (峰值为 185℃) 和 315℃ ~ 490℃ (峰值为 370℃ ~ 380℃) 两个温度段。

表 7 里伍铜矿硫化物中包裹体爆裂测温结果表 (据宋鸿林, 1995)

Table 7 Decrepitation temperatures of the inclusions in the sulfides from the Liwu copper deposit (after Song Honglin, 1995)

样号	矿物名称	粒度 /mm	用量 /g	爆破温度 /℃	峰值温度 /℃	峰值计数 (次 /s)	爆裂温度范围 /℃
Ks-012(1)	黄铜矿	<0.25	2	<135°	<185°	10	135~440
				<312°	<394°	23.5	
Ks012(2)	铁闪锌矿	<0.25	1.5	<135°	<180°	91.5	135~490
				315°	370°	22.5	
Ks001	黄铜矿	<0.25	2				

综上所述,包裹体的平均均一温度和平均爆裂温度表明里伍铜矿及其外围矿区的成矿作用发生于中高温阶段。与前人的研究成果相比,本次包裹体的均一温度相对较低,推测包裹体可能代表成矿晚期的含矿流体。

4.4 成矿流体的盐度

成矿流体是一种含多种离子的盐水溶液,人们通常用 NaCl 的重量百分比 $w(\text{NaCl})$ 来表示盐水溶液的浓度(盐度)。对研究区获得的石盐-气-液-水三相包裹体利用加热法测得石盐子矿物的熔化温度(t),并利用 Potte 等 (1978) 提出的公式计算出含石盐子晶包裹体的盐度: $S=26.218+0.0072t+0.000106t^2$ 。对于矿床中的气液两相包裹体,则利用冷冻法测得其冰点(t),而后利用 Potte 等 (1978) 提出的公式计算出他们的盐度:

$$S=-1.76958t-4.2384\times t\times 10^2-5.2778\times t^2\times 10^{-4}$$

纵合前人的研究成果分析,研究区包裹体的盐度为 15.67(宋铁和等, 1990)。

4.5 成矿流体的密度与压力

依据前面所测得的含矿石英包裹体均一温度值(平均 240℃)以及获得的包裹体的盐度值 $w(\text{NaCl})$ 为 15.67%,根据 NaCl-H₂O 体系中的温度、盐度、密度关系(图 9),得到里伍铜矿包裹体密度为 0.935 g/cm³。

里伍铜矿含矿原岩为一套海相火山岩、碎屑岩沉积,其形成于海相环境。研究区所获得的包裹体主要为气液水两相包裹体,依据前面分析得成矿流体为接近于沸腾状态的中高温热液,在海相环境中,只有海水具有足够深度时,才能阻止热液沸腾。根据不同卤水的沸点图推测发生海底热液喷流的深度应为 300m 左右,并推测其成矿最小压力为 850×10⁵ Pa(图 10)。

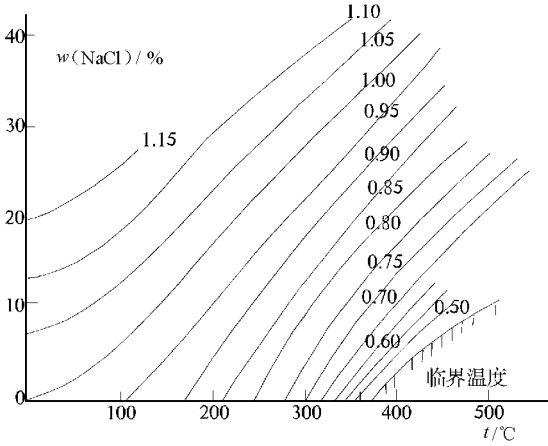


图 9 NaCl-H₂O 体系中与蒸汽共存的液体密度 (g/cm³) (据 Ahmad 等, 1980)

Fig 9 Density of the steam-associated liquids (g/cm³) in the NaCl-H₂O systems (after Ahmad et al., 1980)

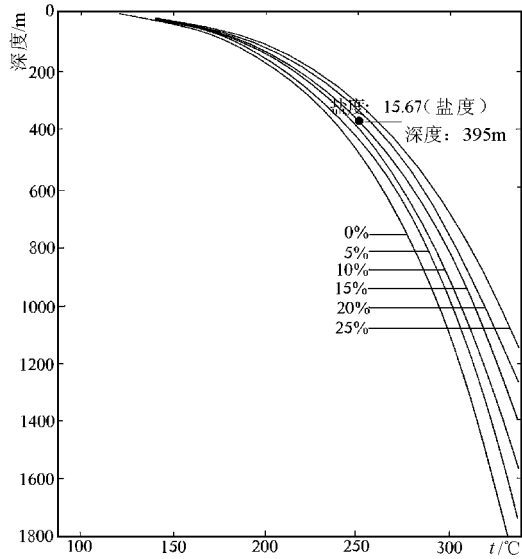


图 10 不同盐度 $w(\text{NaCl})\%$ 卤水的沸点曲线图 (据 Hass Jr, 1971)

Fig 10 Curves for the boiling points of the brines with different salinities ($w(\text{NaCl})\%$) (after Hass Jr, 1971)

5 讨论

(1)里伍铜矿床原始含矿溶液来自于岩浆水和变质水,并在后期可能有较多的大气水的加入;早期为岩浆喷发沉积成岩时期,成矿流体主要为海底火山喷流热液,并混合有海水,从而混合成 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- (\text{SO}_4^{2-})$ 型的热卤水;在成矿晚期由于受构造运动,以及新的岩浆活动等因素的影响,原始喷发沉积形成的含矿物质作为“矿胚”而遭受后期变质构造热液的改造作用,成矿物质发生运移、富集。该期间产生大量的变质水以及通过裂隙渗入的天水(包括大气降水和地层水)混入含矿溶液中而重新混合成 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- (\text{F}^-)$ 型的热卤水。成矿流体也最终形成目前所分析出的含岩浆水、变质水、海水和天水的物质组构特征。

(2)里伍铜矿的矿石硫源由于岩浆喷溢作用发生于海相环境,因此,里伍铜矿的硫源以幔源硫为主,同时混染有海水硫。矿床硫同位素组成既与赋矿岩系的原始硫同位素组成有关,又与变质程度、热液交代作用强度和矿物形成世代有关,但赋矿岩系的原始硫同位素组成是最主要的控制因素,矿床硫主要来源于赋矿岩系本身。

(3)里伍及外围矿区包裹体温度对应3个成矿阶段。其中,中温阶段为江浪变质核杂岩成穹作用后石英脉遭受热液变质时期的温度,相对较高的温

度代表成穹作用发生早期(191Ma)中浅层次脆性条件下金属硫化物及含石英生成时的温度(其中硫化物的生成温度较含石英高),而较低的温度对应石英脉遭受热液蚀变作用晚期的温度。

(4)里伍铜矿含矿原岩为一套海相火山岩、碎屑岩沉积,其形成于海相环境,推测发生海底热液喷流的深度为300m左右,并推测其成矿最小压力为 $850 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

参考文献:

- [1] 杜亚军,田竞亚.里伍铜矿床控矿构造地质特征及演化模式探讨[J].四川地质学报,1996,16(3):213—218
- [20] 颜丹平,宋鸿林,傅昭仁.四川省九龙县江浪穹隆的变形变质作用与里伍铜矿控矿构造模式[J].矿床地质,1994,13(增刊):120—121.
- [3] 姚家栋,李式铜矿床成矿控制条件与找矿前景[J].四川地质学报,1991,11(1):29—36
- [4] 颜丹平,宋鸿林,傅昭仁.扬子地台西缘江浪变质核杂岩的出露地壳剖面构造地层柱[J].现代地质,1997,1(3):290—297
- [5] 傅昭仁,宋鸿林,颜丹平,等.扬子地台西缘江浪变质核杂岩结构及对成矿的控制[J].地质学报,1997,71(2):113—122
- [6] 唐高林,王发清,寇林林.里伍铜矿床地质特征及找矿前景[J].四川有色金属,2006,(4):21—25.
- [7] 翟裕生.构造流体成矿系统及其动力学的理论格架与方法体系[J].中国地质大学学报,2000,25(1):71—78

Quartz inclusions from the ore bearing rocks in the Liwu copper deposit, Jiulong, Sichuan

FENG Xiaoliang², LIU Yansong², ZHANG Huifeng², WU Zhengbo², LI Tongzhong²

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China)

Abstract: The approaches to the sources of ore forming matter are considered as an important aspect for the research of ore deposits. The exsolution of temperatures, compositions and salinity of the quartz inclusions from the ore bearing rocks and geochemical signatures of the Liwu copper deposit, Jiulong, Sichuan has disclosed the sources, migration and enrichment of the ore forming matter, thus help establish a basis for the interpretation of the genesis and mineralization conditions of the Liwu copper deposit.

Key words: Liwu copper deposit; inclusion; mineralizing fluid