

川西里伍铜矿黑云母矿物化学特征及成矿指示意义

邹文¹, 李同柱², 管桦¹, 何立夫¹, 张才森¹

(1. 九龙县雅砻江矿业有限责任公司, 四川 甘孜 626000; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:为了查明川西里伍铜矿黑云母的成因类型、形成的物理化学条件及成矿指示意义,本文对矿化蚀变带中的黑云母开展了电子探针分析。结果显示黑云母具有高SiO₂(平均34.67%)、Al₂O₃(平均19.20%)、FeO(平均22.45%)、MgO(平均7.96%)、K₂O(平均9.37%)特征,属于铁质黑云母。形成于低的氧逸度、中高温(平均531 °C)、较大压力(平均3.99 kbar)与深度(平均深度为15.08 km)的环境。结合前人研究认为,里伍铜矿矿化蚀变带中的黑云母是原生黑云母重结晶改造而成,里伍式富铜矿床与江浪穹窿成矿过程中的变形-变质作用具有成因联系。

关键词:黑云母;矿物化学;成矿意义;里伍铜矿;江浪穹窿

中图分类号:P581

文献标识码:A

引言

按照成因分类,黑云母主要包括岩浆黑云母和热液黑云母,二者分别形成于岩浆结晶过程和热液蚀变过程,并具有明显的产状与形态差异^[1-2]。作为最主要的造岩矿物之一,黑云母的化学成分主要受控于形成时的氧逸度、温度和压力等因素^[2-3]。因此,对黑云母的研究不但可用于揭示岩浆演化过程^[4-5],而且可为矿物重结晶过程研究提供关键信息,进而为寄主岩石、矿床成因及过程研究提供约束信息。

江浪穹窿位于松潘-甘孜造山带东南缘(图1a),在其核部地层里伍岩群中发育一系列与黑云母化相关的高品位(平均品位约2.5%)铜多金属矿床(图1b),被学者统称为里伍式富铜矿床^[6-7],其中以里伍铜矿最具代表性。然而截至目前,学术界对里伍铜矿的成因尚存在较大分歧^[8-11]。基于上述原因,本文针对里伍铜矿矿化蚀变带中的黑云母开展了电子探针成分分析,并结合前人研究成果探讨其成因类型、形成的物理化学条件及成矿指示意义。

1 区域地质

松潘-甘孜造山带总体呈巨大的倒三角形状,西侧以金沙江缝合带为界与青藏高原毗邻,东缘以龙门山断裂带为界与扬子陆块相连,北部以阿尼玛卿-勉略缝合带为界与华北克拉通相邻(图1a)。该造山带受控于古特提斯造山作用,以发育巨厚的(5~15 km)三叠纪复理石为特征^[12];造山带变形过程主要发生于印支期,出露大量的三叠纪花岗岩^[13]。

江浪穹窿核部里伍岩群岩性主要为云母石英片岩、石英岩夹变基性火山岩;前人获得片状石英岩碎屑锆石U-Pb上交点年龄为1437 Ma,斜长角闪岩全岩Sm-Nd等时线年龄为1677~1674 Ma,表明里伍岩群是一套中元古代的变质火山-沉积岩组合^[11]。江浪穹窿翼部地层包括:(1)奥陶系江浪岩组仅分布于江浪穹窿南缘,为含砾石英岩夹石英片岩、千枚岩,主体构成一个韧性剪切滑脱带;(2)志留系甲坝岩组沿穹窿周缘呈环状分布,为一套变硅质岩、碳质板岩夹变基性火山岩组合;(3)二叠系乌拉溪组出露于穹窿外缘,与甲坝岩组呈滑脱断层接触,岩性为大理岩夹少量变基性火山岩和超基性

收稿日期:2019-09-18; 改回日期:2019-02-10

作者简介:邹文(1974-),男,高级工程师,注册安全工程师,从事矿山开发管理工作。E-mail:236581008@qq.com

通讯作者:李同柱(1981-),男,高级工程师,从事成矿预测与矿产勘查工作。E-mail:23000347@qq.com

资助项目:本文得到中国地质调查局成都地质调查中心项目(编号:CDG2019-KF-SK-001)、国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:41902068)的联合资助

岩;(4)三叠系西康群以复理石陆源碎屑岩夹碳酸盐岩为主,与乌拉溪组为韧性剪切带接触。部分学者基于构造解析工作,提出江浪穹窿属于变质核杂岩,基本结构包括前寒武系堆垛层、古生代褶皱层及三叠系西康群板岩带,不同构造地层系统之间发育环状拆离断裂带^[11]。区域岩浆岩主要为燕山期花岗岩与少量中-新元古代、二叠纪基性火山岩。穹窿北侧出露文家坪和乌拉溪花岗岩体(图 1b),岩性为似斑状黑云二长花岗岩,锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄分别为 164.5 ± 0.9 Ma 和 164.3 ± 1.7 Ma^[14]。

2 矿床地质

里伍铜矿位于江浪穹窿南东翼(图 1b),矿区地层为里伍岩群和第四系(图 2),前者以片状石英岩为主,次为石英片岩,变粒岩偶见。造岩矿物主要为石英、黑云母、绢云母及少量石榴石、绿泥石,偶见特征变质矿物如十字石、蓝晶石。矿区总体地貌为向南东倾斜的单斜构造,产状由倾向 90°渐变为

倾向 160°。出露的岩浆岩主要为变基性火山岩,岩性包括斜长角闪(片)岩、(透闪)阳起石岩、绿泥斜长片岩及绿泥角闪岩等,多呈透镜体平行地层片理产出,出露长度一般为 50 m、厚度约 2-3 m^[8-9]。

矿化蚀变带主要分布于矿区南北两缘,大体平行里伍岩群片理呈(似)层状和不规则透镜状产出^[8-9],可分为上、下两个层位:(1)上层矿化蚀变带裸露于地表陡崖,受堆垛层石英岩控制,含 A、B 矿体;该带由西向东有穿层上升现象,东段厚 10-20 m,西段 40-50 m,局部达 120 m。(2)下层矿化蚀变带隐伏产出,受其下的逆冲剪切带约束,含 D、E 矿体;该带由西向东有穿层下降趋势,厚度 30-40 m,局部达 100 m。在两层矿化蚀变带之间,尚有规模不大的矿化蚀变带呈(似)层状和透镜状产出(图 3)。蚀变类型主要包括黑云母化、电气石化、硅化、绢云母化和绿泥石化等。此外,矿区还有 20 多个大小不一的褪色矿化蚀变带,是重要找矿标志。

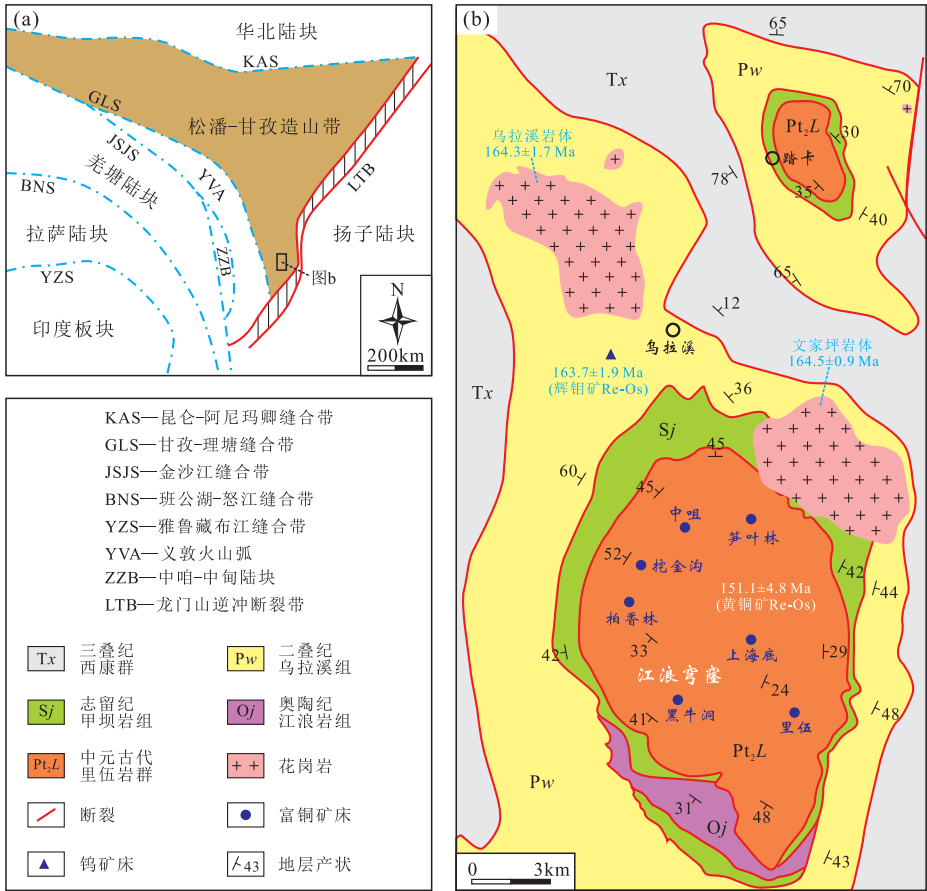


图 1 江浪穹窿大地构造位置及区域地质图

Fig. 1 Tectonic position and regional geological map of the Jianglang dome

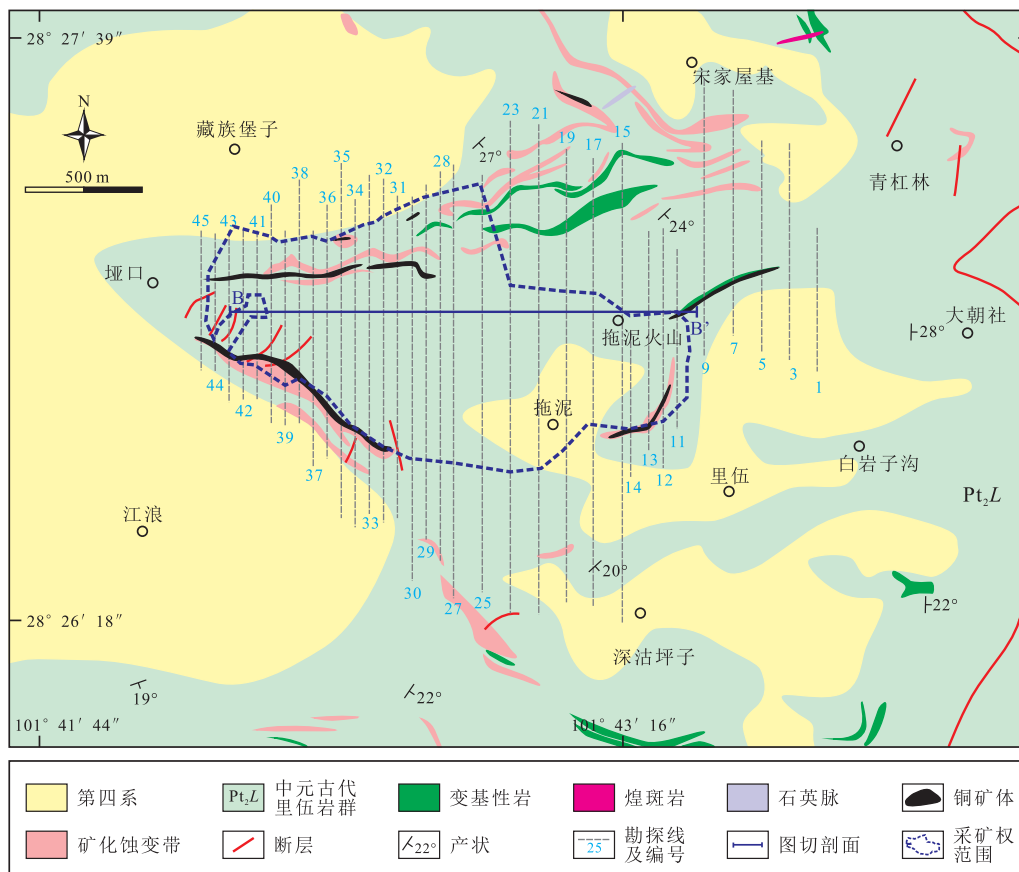


图2 里伍矿区地质图

Fig. 2 Geological map of the Liwu copper deposit

铜矿体主要受层间滑动面控制,倾向南东,呈(似)层状和透镜状产出,成带层叠出现,标高介于 2350-2900 m(图 3),平均厚度 2.43 m。矿体在垂向上平行叠置,由浅到深可分为 A、B、C、D、E 五个层位^[8-9],部分雁尾相接呈串珠状。大部分矿体结构简单,产状稳定,局部地段由于次级褶皱及层间破碎带导致矿体分支复合。矿体倾角约 20°,矿区东部(35 勘探线以东)倾向 95-159°,西部倾向 128-226°;东西向展布约 2500 m,南北向延伸约 800 m。

矿石矿物主要为磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿,次为方铅矿、黄铁矿、钛铁矿。脉石矿物以石英、绢云母、黑云母、绿泥石、长石为主,含少量磷灰石、石榴石、蓝晶石。矿石构造主要包括致密块状和浸染状,全矿平均含铜 2.5%、锌 0.75%、硫 12.8%。在走向上,西部铜高锌低,东部铜低锌高;在垂向上,上部的 A-B1 矿体铜低锌高、B2-B5 矿体铜高锌低,下部的 D2、E1、E2 矿体铜高锌低。

3 样品采集与测试

本次在里伍铜矿矿化带中采集了含石榴子石绿泥石英片岩样品。LY-9 采自 2480 中段,岩石为灰绿色,鳞片粒状变晶结构、片状构造,主要由石英、绿泥石、黑云母、石榴子石和暗色矿物组成。石英粒度 0.04-1.0 mm,含量约 45%,颗粒被定向拉长,部分发生碎裂;绿泥石呈纤维状被挤压拉长,具多色性,含量约 20%;黑云母呈片状,半定向排列,具有浅黄-红褐色多色性,含量约 25%,大小 0.04-4 mm;石榴子石呈粒状,部分被定向拉长,粒度 0.4-4.8 mm,含量约 5%。此外,还含有黄铁矿等不透明矿物,粒度 0.08-3.2 mm,含量约 5%。

LY-15 采自 2455 中段,岩石为灰绿色,鳞片粒状变晶结构、片状构造,主要由石英、绿泥石、黑云母、石榴子石和暗色矿物组成。粒状矿物有石英和石榴子石:石英粒度 0.4-6.4 mm,含量约 30%,部分包裹碎裂成小颗粒的石英;石榴子石呈均质性、正高突起,粒度 0.28-10 mm,含量约 2%。片状矿物有黑云母和绿泥石:黑云母呈片状,具多色性和平行消光特征,含量约 35%,粒度 0.16-3.2 mm;绿泥石

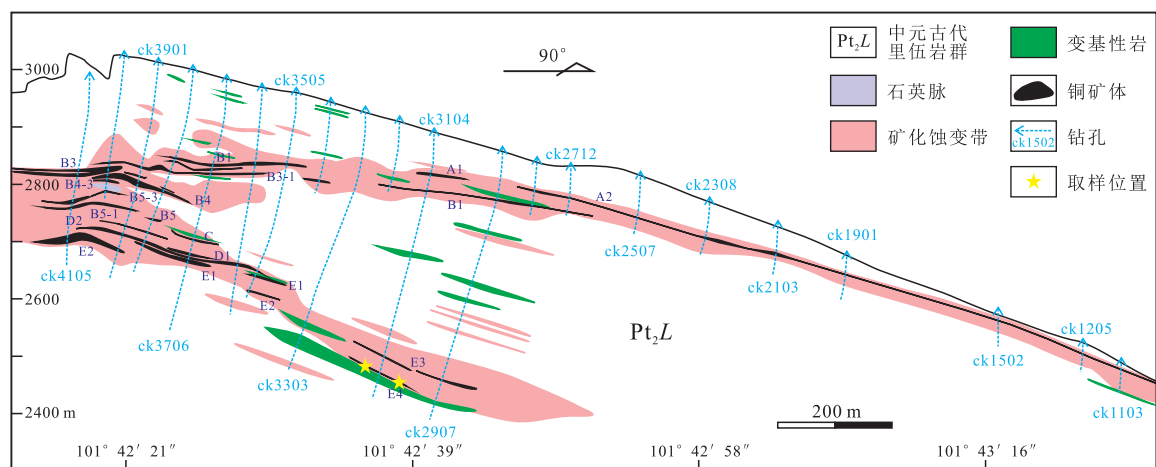


图3 里伍矿区 B-B' (图2) 图切地质剖面图

Fig. 3 B-B' (Fig. 2) map-cut geological section of the Liwu copper deposit

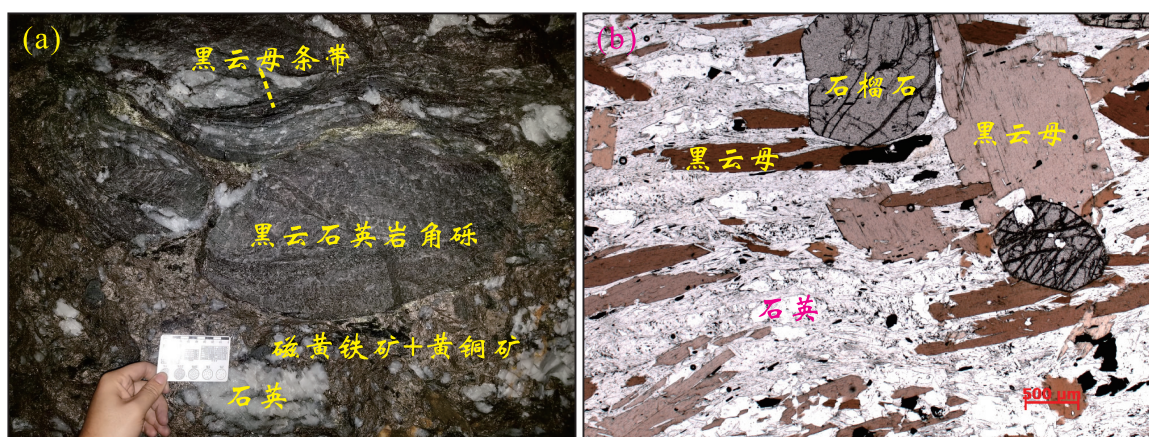


图4 里伍矿区黑云母野外及镜下特征

Fig. 4 Field and microscopic features of biotite in the Liwu copper deposit

呈羽毛状交叉分布,具多色性、正低突起,含量约30%。此外,还含有黄铁矿等不透明矿物,粒度0.08-2.6 mm,含量约3%。

探针片切制工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,具体按照 DZ/T 0130-2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》相关要求执行。野外调查显示,里伍铜矿与成矿关系密切的黑云母多呈条带状沿片理分布(图4a)。镜下观察表明,黑云母普遍为红棕色,呈板片状,具有一组极完全解理;其边部较为平直,未发育明显的绿泥石化和绢云母化(图4b)。

矿物电子探针分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,主要执行标准为 GB/T 15074-2008《电子探针定量分析方法通则》和 GB/T 17359-2012《微束分析能谱法定量分析》。实验测试过程使用 JXA-8100 电子探针分析仪,工作条件为加

速电压 20 kV,束流 10 nA,束斑直径 5 μm,出射角 40°。分析方式为波谱分析,标样采用天然矿物或合成金属国家标准,检出限 0.002%。

4 分析结果

黑云母电子探针分析数据及相应的计算结果列于表1。结果显示,里伍铜矿矿化蚀变带中的黑云母主要化学组成为 SiO₂ (37.01-33.56%, 平均 34.67%)、TiO₂ (1.76-1.26%, 平均 1.53%)、Al₂O₃ (20.17-17.75%, 平均 19.20%)、FeO (24.19-20.30%, 平均 22.45%)、MgO (9.19-6.75, 平均 7.96%)、K₂O (9.57-9.18%, 平均 9.37%), MnO、CaO 和 Na₂O 含量普遍低于 1% (表1)。在哈克图解上,黑云母的 MgO 和 FeO 元素含量具有明显的负相关关系(图5a),表明 Mg、Fe 两种阳离子可能以类质同象的形式存在。

以 22 个氧原子为基计算的阳离子数结果表明, 本次研究的黑云母阳离子以 Si (5.57-5.21, 平均 5.32)、 Fe^{2+} (2.83-2.17, 平均 2.55)、Mg (2.06-

1.56, 平均 1.82)、K (1.90-1.77, 平均 1.83)、 Al^{IV} (2.79-2.43, 平均 2.68) 和 Al^{VI} (0.98-0.64, 平均 0.79) 为主(表 1)。

表 1 里伍矿区黑云母电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analyses of biotite in the Liwu copper deposit

测点	LY-9-1	LY-9-2	LY-9-3	LY-9-4	LY-9-5	LY-9-6	LY-15-1	LY-15-2	LY-15-3	LY-15-4	LY-15-5	LY-15-6
SiO ₂	34.17	33.56	34.57	34.1	34.02	33.75	35.02	34.82	34.82	35.02	37.01	35.21
TiO ₂	1.33	1.43	1.37	1.26	1.26	1.62	1.64	1.68	1.68	1.62	1.76	1.66
Al ₂ O ₃	20.17	20.06	19.72	20.11	19.82	19.34	19.02	19.1	18.89	18.15	17.75	18.31
FeO	22.91	23.44	23.95	23.96	22.69	24.19	21.47	21.67	21.45	21.87	20.3	21.44
MnO	0.02			0.02			0.11	0.13	0.12	0.11	0.14	0.09
MgO	7.03	6.75	7.03	6.82	7.14	6.77	8.98	8.87	8.89	8.97	9.19	9.06
CaO												
Na ₂ O	0.12	0.17	0.07	0.12	0.25	0.26	0.21	0.35	0.4	0.35	0.23	0.34
K ₂ O	9.39	9.57	9.48	9.55	9.26	9.41	9.34	9.38	9.24	9.41	9.23	9.18
Cr ₂ O ₃	0.05	0.04	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02		0.09	0.04	0.04	0.03
NiO									0.05			
总量	95.19	95.02	96.21	95.96	94.49	95.36	95.81	96	95.63	95.54	95.65	95.32
以 22 个氧原子为基计算的阳离子数												
Si	5.30	5.21	5.29	5.24	5.28	5.24	5.32	5.29	5.31	5.36	5.57	5.38
Al	3.68	3.67	3.55	3.64	3.62	3.54	3.41	3.42	3.40	3.28	3.15	3.30
Ti	0.16	0.17	0.16	0.15	0.15	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19
Fe^{3+}	0.36	0.32	0.35	0.33	0.34	0.31	0.33	0.30	0.31	0.29	0.38	0.32
Fe^{2+}	2.61	2.73	2.71	2.75	2.60	2.83	2.40	2.45	2.43	2.51	2.17	2.41
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
Mg	1.62	1.56	1.60	1.56	1.65	1.57	2.03	2.01	2.02	2.05	2.06	2.06
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.04	0.05	0.02	0.04	0.08	0.08	0.06	0.10	0.12	0.10	0.07	0.10
K	1.86	1.90	1.85	1.87	1.83	1.86	1.81	1.82	1.80	1.84	1.77	1.79
Al^{IV}	2.70	2.79	2.71	2.76	2.72	2.76	2.68	2.71	2.69	2.64	2.43	2.62
Al^{VI}	0.98	0.88	0.84	0.88	0.90	0.78	0.73	0.72	0.71	0.64	0.72	0.67
Fe/(Fe + Mg)	0.65	0.66	0.66	0.66	0.64	0.67	0.57	0.58	0.58	0.58	0.55	0.57
Mg/(Mg + Fe)	0.35	0.34	0.34	0.34	0.36	0.33	0.43	0.42	0.42	0.42	0.45	0.43
$\text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{\text{VI}} + \text{Ti}$	1.50	1.37	1.35	1.36	1.39	1.28	1.24	1.21	1.21	1.12	1.30	1.19
$\text{Fe}^{2+} + \text{Mn}$	2.61	2.73	2.71	2.75	2.60	2.83	2.42	2.47	2.44	2.52	2.19	2.43
T/°C	494	512	497	472	479	543	557	562	563	555	575	562
P/kbar	4.63	4.59	4.24	4.51	4.45	4.19	3.79	3.84	3.77	3.40	3.01	3.46
H/km	17.52	17.36	16.03	17.03	16.81	15.84	14.32	14.51	14.23	12.85	11.36	13.06

备注:(1)元素含量单位为%;(2)空白值低于检测限;(3) $T = \{ [\ln(\text{Ti}) - a \cdot c \cdot (\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}))^3] / b \}^{0.333}$, $a = -2.359$, $b = 4.6482 \times 10^{-9}$, $c = -1.7283$;(4) $P = 3.03 \times \text{Al}-6.53 (\pm 0.33)$;(4) $H = P/\rho g$, $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

5 讨论

5.1 黑云母成因类型

根据前人提出的分类方案^[15-16],里伍铜矿黑云母属于铁叶云母(图 5b)或铁质黑云母(图 5c),显示了富铁的矿物化学特征。另外,这些黑云母的 Fe/(Fe + Mg) 值变化范围较小,介于 0.67-0.55(表

1),暗示黑云母原始成分基本未受后期流体改造作用的影响^[17]。需要指出,本次测试获得的 CaO 含量均低于检测限(表 1),显示出贫 Ca 或者无 Ca 特征,同样说明黑云母的原始成分不受或者很少受岩浆期后热液变质而引起的绿泥石化和绢云母化蚀变的影响^[18]。

黑云母按照成因可以分为岩浆黑云母和热液

黑云母,它们在岩相学上具有明显的不同:(1)岩浆黑云母常呈斑晶或显微斑晶,多为自形-半自形的片状产出,包裹早期结晶的磁铁矿、磷灰石、榍石、锆石等副矿物,沿着边缘或裂隙被绿泥石或热液黑云母交代;(2)热液黑云母又分为热液交代黑云母和热液新生黑云母,前者重结晶成细鳞片状集合体,呈半自形-他形产出,后者一般呈现出弥散状、脉状结构,呈自形-半自形-他形,多色性弱,褐色不明显或者出现浅绿色^[2]。野外和镜下观察结果显示,里伍铜矿黑云母与热液交代黑云母的特征较为相似(图4)。Nachit 等(2005)用 $10\text{TiO}_2\text{-FeO}^*\text{-MgO}$ ($\text{FeO}^* = \text{FeO} + \text{MnO}$) 三角分类图区分岩浆黑云母、重结晶黑云母和热液新生黑云母^[19]。该图解显示,本次研究的黑云母全部落入重结晶黑云母区域(图5d),表明它们并不属于岩浆黑云母或者热液过程中新生成的黑云母,而最有可能是原生黑云母遭受了次生改造(例如重结晶作用)所导致^[5]。

5.2 物理化学条件

众所周知,黑云母的化学成分能够限定形成时的物化条件,例如氧逸度、温度和压力等。由于里伍铜矿黑云母均属重结晶黑云母,其物化条件可能是对重结晶作用的反映^[5]。已有研究表明,黑云母 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 原子百分数可以用来估算形成时的氧逸度^[3]。 $\text{Fe}^{3+}\text{-Fe}^{2+}\text{-Mg}$ 图解显示,里伍铜矿黑云母样品主要落在 Ni-NiO 缓冲线附近(图6a),暗示其形成时具有较低的氧逸度条件^[3]。

黑云母的 Ti 含量对温度十分敏感,可以用于估算黑云母的形成温度。前人对过铝质变质泥岩中的黑云母开展了研究,并提出了利用 Ti 含量计算黑云母形成温度的经验公式^[20]: $T = \{ [\ln(\text{Ti}) - a - c * (\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}))^3] / b \}^{0.333}$, 其中 $a = -2.359$, $b = 4.6482 \times 10^{-9}$, $c = -1.7283$ 。计算获得的里伍铜矿黑云母的结晶温度为 $575\text{-}472\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均 $531\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表1), 表明形成于中高温环境。另外, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})\text{-Ti}$ 图解^[20]显示,黑云母落点均位于 $600\text{-}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内(图6b),与上述计算结果一致。

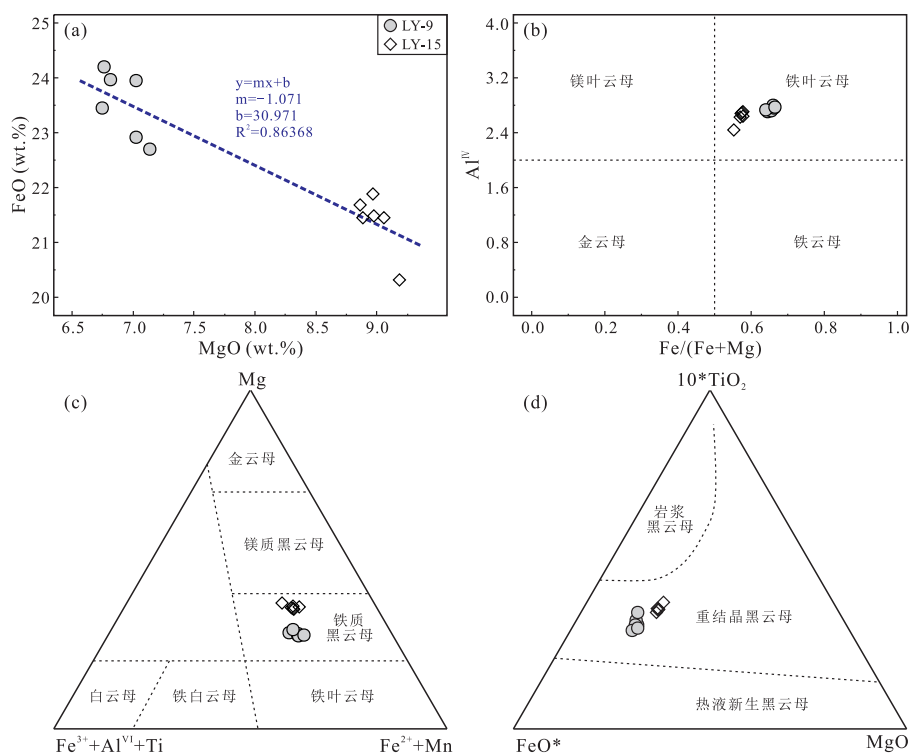


图5 (a) MgO-FeO 二元图解; (b) $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})\text{-Al}^{\text{IV}}$ 分类图解, 底图据文献[15]; (c) $\text{Mg-(Fe}^{3+} + \text{Al}^{\text{VI}} + \text{Ti})\text{-(Fe}^{2+} + \text{Mn})$ 分类图解, 底图据文献[16]; (d) $10 * \text{TiO}_2\text{-FeO}^*\text{-MgO}$ 分类图解, 底图据文献[19]

Fig. 5 (a) MgO-FeO binary diagram; (b) $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})\text{-Al}^{\text{IV}}$ classification diagram, after reference [15]; (c) $\text{Mg-(Fe}^{3+} + \text{Al}^{\text{VI}} + \text{Ti})\text{-(Fe}^{2+} + \text{Mn})$ classification diagram, after reference [16]; (d) $10 * \text{TiO}_2\text{-FeO}^*\text{-MgO}$ classification diagram, after reference [19]

研究表明,黑云母的全铝含量与形成压力关系密切^[21],二者关系式为: $P(\text{kbar}) = 3.03 \times \text{Al}-6.53 (\pm 0.33)$,其中 Al 指以 22 个氧原子为基础计算的黑云母中的 Al 阳离子数。据此计算里伍铜矿黑云母结晶压力为 4.63-3.01 kbar,平均 3.99 kbar(表 1)。结晶深度采用 $P = \rho gH$ 进行换算,其中 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,获得深度为 17.52-11.36 km,平均深度为 15.08 km(表 1)。该深度与里伍岩群广泛发育韧性剪切变形的地质事实^[7, 11]完全吻合。

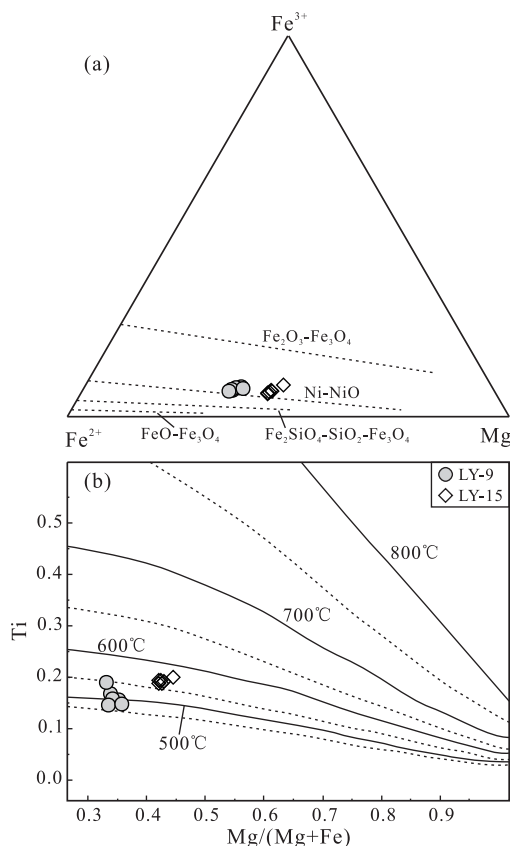


图 6 (a) $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}$ 图解,底图据文献[3];(b) $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})-\text{Ti}$ 图解,底图据文献[20]

Fig. 6 (a) $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}$ diagram, after reference [3]; (b) $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})-\text{Ti}$ diagram, after reference [20]

5.3 成矿指示意义

成矿年代学研究结果显示,江浪穹窿北部乌拉溪岩体南缘矽卡岩型钨矿床的辉钼矿 Re-Os 模式加权平均年龄为 $163.7 \pm 1.9 \text{ Ma}$ ^[22],里伍矿区和中咀矿区块状-脉状矿石中的黄铜矿 Re-Os 等时线年龄为 $151.1 \pm 4.8 \text{ Ma}$ ^[10]。因此,部分学者认为江浪穹窿存在一期与 $\sim 164 \text{ Ma}$ 花岗质岩浆活动^[14]相关的热液矿化事件,并进一步提出里伍式富铜矿床属于

后生的热液型矿床^[10, 23]。本次研究表明,里伍铜矿矿化蚀变带中的黑云母为铁质黑云母;它们不属于岩浆黑云母或者热液新生黑云母,最有可能是原生黑云母遭受了重结晶改造所形成,结合其形成的温度及深度,本文认为江浪穹窿成穹过程中的变形-变质作用很可能对其核部的铜矿化事件同样起到重要作用。

6 结论

(1) 里伍铜矿黑云母为铁质黑云母,其岩相学、矿物化学特征与岩浆黑云母、热液新生黑云母差异明显,应当是原生黑云母遭受了重结晶改造形成。

(2) 这些黑云母形成于低氧逸度、中高温、较大的压力与深度条件。

(3) 里伍式富铜矿床的发育很可能与江浪穹窿成穹过程中的变形-变质作用具有成因联系。

致谢:匿名审稿专家为本文的修改和润色提供了诸多有益建议,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] Selby D, Nesbitt B E. Chemical composition of biotite from the Casino porphyry Cu-Au-Mo mineralization, Yukon, Canada: Evaluation of magmatic and hydrothermal fluid chemistry [J]. Chemical Geology, 2000, 171(1-2): 77-93.
- [2] 唐攀,唐菊兴,郑文宝,等. 岩浆黑云母和热液黑云母矿物化学研究进展[J]. 矿床地质, 2017, 36(4): 935-950.
- [3] Wones D R, Eugster H P. Stability of biotite: Experiment, theory and application[J]. The American Mineralogist, 1965, 50: 1228-1272.
- [4] 肖庆玲,周涛发,袁峰,等. 安徽茶亭铜金矿床赋矿石英闪长玢岩黑云母成分特征及成岩成矿指示意义[J]. 矿床地质, 2018, 37(6): 1179-1194.
- [5] 龚林,陈华勇,王云峰,等. 新疆玉海-三岔口铜矿黑云母矿物化学特征及成岩成矿意义[J]. 地球科学, 2018, 43(9): 2929-2942.
- [6] 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(6): 691-696.
- [7] 代堰铭,张惠华,朱玉娣,等. 扬子陆块西缘江浪穹窿及“里伍式”富铜矿床研究进展与问题[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(1): 66-78.
- [8] 姚家栋. 试论李伍铜矿床成因[J]. 四川地质学报, 1990, 10(4): 251-258.
- [9] 宋铁和,幸石川. 李伍铜矿床成因探讨[J]. 西南矿产地质, 1990, 4(4): 1-4.
- [10] 李同柱,周清,张惠华,等. 四川西部里伍式富铜矿床黄铜矿 Re-Os 定年及其成矿意义[J]. 地质学报, 2017, 91

- (12): 2727–2738.
- [11] 颜丹平, 宋鸿林, 傅昭仁, 等. 扬子地台西缘变质核杂岩带 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [12] Roger F, Jolivet M, Malavieille J. The tectonic evolution of the Songpan-Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to Present: A synthesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39(4): 254–269.
- [13] 许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 中国松潘带的造山过程 [M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [14] 朱玉娣, 代堰鎔, 王丽丽, 等. 松潘—甘孜造山带南缘江浪穹窿文家坪花岗岩成因及地质意义 [J]. *现代地质*, 2018, 32(1): 16–27.
- [15] Deer W A, Howie R A, Zussman J. An introduction to the rock-forming minerals (second edition) [M]. London: Longman Scientific and Technical, 1992.
- [16] Foster M D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. US Government Printing Office, 1960, 354B: 1–49.
- [17] Stone D. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens river area, northwest superior province, Ontario, Canada [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2000, 38(2): 455–470.
- [18] Kumar S and Pathak M. Mineralogy and geochemistry of biotites from Proterozoic granitoids of western Arunachal Himalaya: Evidence of bimodal granitogeny and tectonic affinity [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2010, 75(5): 715–730.
- [19] Nachit H, Ibhi A, Abia E H et al. Discrimination between primary magmatic biotites, re-equilibrated biotites and neoformed biotites [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2005, 337(16): 1415–1420.
- [20] Henry D J, Guidotti C V, Thomson J A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelites biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms [J]. *American Mineralogist*, 2005, 90: 316–328.
- [21] Uchida E, Endo S and Makino M. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Resource Geology*, 2007, 57(1): 47–56.
- [22] 李同柱, 周清, 张惠华, 等. 川西乌拉溪钨矿床地质特征及辉钨矿 Re-Os 定年 [J]. *高校地质学报*, 2016, 22(3): 423–430.
- [23] 李同柱, 冯孝良, 代堰鎔, 等. 川西里伍式富铜矿床成矿地质条件及找矿前景分析 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2016, 36(3): 8–15.

Chemical composition and metallogenic significance of biotite from the Liwu copper deposit, western Sichuan Province

ZOU Wen¹, LI Tongzhu², GUAN Hua¹, HE Lifu¹, ZHANG Caisen¹

(1. *Jiulong Yalongjiang Mining Co., Ltd., Ganzi 626200, Sichuan, China*; 2. *Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China*)

Abstract: In order to ascertain the genetic type, physicochemical conditions and metallogenic significance, electron probe analysis of biotite in alteration zone of the Liwu copper deposit is carried out in this paper. The results show that these biotite grains: (1) have high SiO₂ (average 34.67%), Al₂O₃ (average 19.20%), FeO (average 22.45%), MgO (average 7.96%) and K₂O (average 9.37%) contents, and are primary iron biotite; (2) were formed in low oxygen fugacity conditions, medium to high temperature environment (average 531 °C) and high pressure (average 3.99 kbar). Combined with previous data, it is believed that biotite in the Liwu copper deposit is probably formed by recrystallization of primary biotite, and the Liwu-type high-grade copper deposit is most likely related to the deformation-metamorphism during the doming process of the Jianglang dome.

Key words: biotite; mineral chemistry; metallogenic significance; Liwu copper deposit; Jianglang dome