

云南普朗斑岩型铜矿成矿岩体的基本特征

李文昌^{1,2} 刘学龙^{1,2} 曾普胜³ 尹光侯²

(1.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083;2.云南省地质调查局,云南昆明 650051;
3.中国冶金地质总局,北京 100025)

摘要:普朗斑岩型铜矿是格咱地区印支期斑岩型铜矿的典型代表,产于义敦构造-岩浆带南端的复式岩体。复式岩体为浅成-超浅成的中酸性斑(玢)岩体,可划分为 3 个侵入阶段,最早为石英闪长玢岩,中期为石英二长斑岩,晚期为花岗闪长斑岩。岩石地球化学特征表明,岩石富集 Ba、La、Rb、Sr、K 和亲铜元素 Cu、Pb,亲铁元素 Mo、Ni,亏损 Nb、Zr、Hf、Ti。斑(玢)岩与岛弧花岗岩的岩石系列相同,属钙碱性岩系,成因类型一致,属 I 型花岗岩。普朗斑岩型铜矿床主要产于印支期的中酸性斑(玢)岩体,成矿作用受岩浆岩、侵入地层、热液运移、热液蚀变作用和构造空间的控制,其印支期构造-岩浆-热液之间的耦合,共同形成了斑岩成矿系统。

关键词:斑岩型铜矿;地球化学特征;成矿作用;成矿系统;普朗;云南

中图分类号:P618.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)02-0403-12

普朗斑岩型铜矿床位于中国西南“三江”构造岩浆成矿带,产于义敦岛弧带南端的格咱岛弧,是中国近年来发现的印支期重要斑岩型铜矿床,已引起国内外众多学者的关注。

义敦岛弧形成于印支期^[1-2],在晚三叠世发育了完整的沟-弧-盆构造体系。产出普朗铜矿的复式岩体位于义敦岛弧的外弧带,靠近俯冲带一侧。晚三叠世中晚期甘孜-理塘洋壳向西俯冲(238~206 Ma),在格咱地区由于俯冲角度变缓而形成挤压性岛弧,并产出与压性构造环境有关的斑岩型铜矿床^[3-5],其成岩成矿时代等前人作了较多研究^[6-10],成矿规律和矿床地质特征也有较多的讨论与报道^[11-18]。然而,普朗斑岩铜矿成矿岩体地球化学特征的系统总结,成矿作用深入研究,及其二者之间的联系等方面的研究比较缺乏。因此,本文在前人研究的基础上,进一步对资料分析和补充,探讨斑(玢)岩体的成因、成矿背景及成矿系统,为该地区构造-岩浆带多金属成矿作用的研究提供基础资料。

1 矿床地质概况

从岛弧造山带发展阶段和侵入岩分布、岩石组合、地球化学特征,将格咱岛弧花岗岩带大致从西到东分为:Ⅰ翁上-雪鸡坪岛弧岩亚带(西)、Ⅱ红山-属都蛇绿混杂岩带、Ⅲ亚杂-普朗岛弧斑岩亚带(东)^[9]。普朗铜矿位于亚杂-普朗岛弧斑岩亚带,受印支期普朗复式中酸性斑(玢)岩体控制。

矿区出露地层主要为上三叠统,自上而下为:曲嘎寺组(T_{3q})、图姆沟组(T_{3t})和喇嘛垭组(T_{3lm})。火山岩主要是晚三叠世卡尼期至诺利期以安山岩为主的钙碱性系列玄武岩-安山岩组合。普朗复式岩体侵入于图姆沟组的砂板岩和安山岩中,岩体呈不规则产出,NW 向展布,地表出露面积约为 12 km²(图 1),侵入岩为与安山岩同源的印支期中酸性浅成斑岩^[9],而印支期中酸性浅成斑岩体与成矿关系密切。矿体空间上呈 NW 向展布,平面上为一不规则的卵形,剖面上呈一向上凸起的穹隆,中间铜品位高,向四周铜品位逐渐

收稿日期:2010-08-18;改回日期:2010-11-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划 973 项目(2009CB421007)、中国地质调查局项目(1212011085137)资助。

作者简介:李文昌,男,1962 年生,教授,博士生导师,长期从事地质矿产勘查与项目管理;E-mail:Lwenchangynddy@163.com。

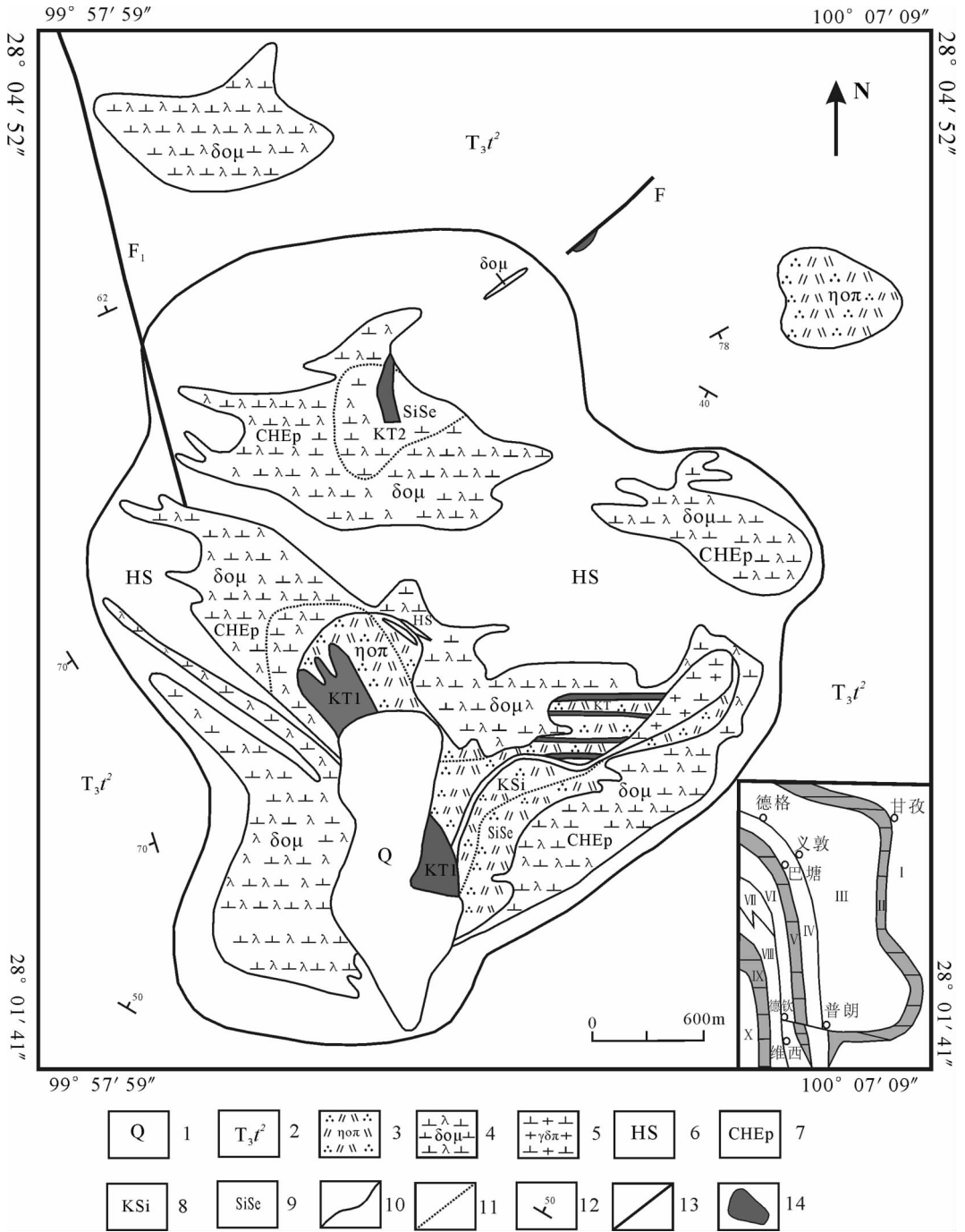


图1 普朗斑岩型铜矿地质图(据云南省地质调查局修改)

1—第四系;2—上三叠统图姆沟组;3—印支期石英二长斑岩;4—印支期石英闪长玢岩;5—印支期花岗闪长斑岩;
 6—角岩化带;7—青磐岩化带;8—钾化带;9—绢云岩化带;10—地层界线;11—蚀变界线;12—产状;13—断层;14—矿体;
 I—扬子板块;II—甘孜—理塘板块结合带;III—义敦岛弧带;IV—中咱微陆块;V—金沙江结合带;VI—江达—维西火山
 弧;VII—昌都—兰坪陆块;VIII—三达山—景洪火山弧;IX—澜沧江结合带;X—保山地块

Fig.1 Geological sketch map of the Pulang porphyry copper deposit (modified after Yunnan Geological Survey)
 1—Quaternary; 2—Upper Triassic Tumugou Formation; 3—Indosinian quartz monzonite porphyry; 4— Indosinian quartz diorite
 porphyryite; 5— Indosinian granodiorite—porphyry; 6—Hornfelsized belt; 7—Propylitization belt; 8—Potassic—alteration belt;
 9—Sericitolitized belt; 10—Geological boundary; 11—Alteration boundary; 12—Attitude; 13—Fault; 14—Ore body; I—Yangtze
 block; II—Garze—Litang suture; III—Yidun Island—arc belt; IV—Zhongza massif; V—Jingshajiang suture; VI—Jiangda—Weixi
 volcanic arc; VII—Changdu—Langping block; VIII—Sandashan—Jinghong volcanic arc; IX—Langcangjiang suture; X—Baoshan block

变低。矿体中心矿化连续,向四周有分枝现象。矿体顶、底板与含矿岩石一致,主要为石英二长斑岩,其次为石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩。矿石以硫化矿为主。石英二长斑岩体即为矿(化)体,矿体控制厚度 17.00~700.30 m,铜品位为 0.20%~3.74%,平均为 0.44%,品位变化系数为 68.69%,属较均匀。

普朗斑岩型铜矿床热液蚀变类型多,主要有钾化、钠长石化、硅化、绢云母化、绿泥石化、粘土化、钠黝帘石化以及作为成矿作用直接标志的硫化物化;热液蚀变分带明显具典型的“斑岩型”蚀变分带,由中心向外可划分为强硅化带→钾化硅化带→绢云岩化带→青磐岩化带。围岩蚀变分布宽广,主要为围岩的角岩化。矿化作用主要发生于蚀变中心部位的钾化硅化带、绢英岩化带中,蚀变越强,矿化越好。

2 岩体岩相学特征

与矿化有关的普朗复式岩体类型复杂,最早为石英闪长玢岩(221.0±1.0 Ma),中期为石英二长斑岩(211.8±0.5 Ma),晚期为花岗闪长斑岩(206.3±0.7 Ma)^[14]。

石英闪长玢岩:灰色、灰黑色,斑状结构,基质具细粒微粒结构,粒径平均为 2~0.2 mm、显微粒状结构,粒径平均为 0.1 mm 左右、半自形粒状结构等,块状构造。斑晶含量为 25%~65%,平均为 42%,斑晶主要由斜长石、角闪石、黑云母,有少量的石英和钾长石构成,粒径平均为 12~2 mm,最大 20 mm,结构比较均一。斜长石呈板状,具聚片双晶和环带结构(图 2-1)。岩石蚀变以绢英岩化和青磐岩化为主,局部有次闪石化。含铜石英闪长玢岩(图 2-2)具黄铜矿化、黄铁矿化,呈浸染状构造产出,铜品位一般为 0.2%~0.8%。脉石矿物主要有石英、绢云母、长石、绿泥石、粘土等。结构为半自形—他形粒状结构、交代溶蚀结构、交代残余结构;构造以细脉浸染状为主,局部有鲕状、豆状构造。

石英二长斑岩:灰色,斑状结构,基质具半自形粒状结构,粒径平均为 5~0.5 mm,块状构造。斑晶含量为 6%~48%,平均为 33%,斑晶成分主要为钾长石、斜长石、石英,有少量角闪石、黑云母,粒径平均为 12~5 mm,最大 20 mm(图 2-3)。钾长石斑晶含量为 1%~20%,平均为 8.9%,呈板状,具卡氏双晶(图 2-3),有少量微斜长石、正长石或条纹长石。岩石蚀变以钾化、绢英岩化、硅化为主,局部有绿泥石化。含

铜石英二长斑岩(图 2-4),具强黄铜矿化、黄铁矿化,细—微粒状黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿呈细脉浸染状分布于脉石矿物中,金属矿物含量 2%~7%,矿石铜品位一般 0.2%~2.74%。矿石中除铜之外,含有金、银、钼、硫、铂、钯等多种有用伴生组分。脉石矿物主要有石英、绢云母、长石、绿泥石、粘土等,矿石结构有半自形—他形粒状结构、溶蚀结构;矿石构造有细脉浸染状、斑杂状等。

花岗闪长斑岩:灰色,斑状结构,基质具半自形粒状结构,粒径平均为 5~0.5 mm,块状构造。斑晶含量为 25%~40%,平均为 33%,斑晶成分主要为钾长石、斜长石、石英、黑云母,粒径平均为 12~5 mm,最大 20 mm。钾长石斑晶含量为 10%~20%,呈板状,具卡氏双晶。岩石具绢英岩化或硅化钾化为主,局部有绿泥石化。

3 地球化学特征

3.1 样品的分析测试

样品主要采自普朗复式岩体的钻孔岩心。主元素分析由贵阳地球化学研究所完成,样品数 10 件,采用 X-荧光光谱仪(XRF)测定,精度优于 5%。微量元素和稀土元素分析由核工业地质研究分析测试中心测试,样品数 18 件。测试仪器为 Finnigan MAT 制造的 Element I 型 ElementII 高分辨率电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),相对湿度 30%,误差范围小于 5%,分析结果见表 1~2。

3.2 主元素特征

普朗含矿斑岩的氧化物含量(表 1)中 SiO₂ 为 57.11%~65.01%,属于中酸性岩;石英闪长玢岩个别样品的 SiO₂>53%,可能为硅化引起。Al₂O₃ 含量为 14.21%~15.27%,变化不大,(K₂O+Na₂O) 为 3.15%~9.36%,平均 6.75%,较中酸性岩含量较高,K₂O/Na₂O 为 0.04%~3.8%,里特曼指数(σ)为 0.4~4.14,固结指数(SI)为 11.4~56.97,分异指数(DI)为 32~80.09,属于钙碱性系列,也指示岩浆分异一般较好。A/CNK 为 0.198~1.229,平均为 0.747,在 TAS 图解(图 3)中,多数样品投影点落入闪长岩、二长岩和石英二长岩区域内,具有成矿专属性特征。

3.3 稀土及微量元素含量特征

对区内与成矿关系密切的石英闪长玢岩、石英二长斑岩以及花岗闪长斑岩,进行了有关稀土元素地球化学参数的计算,并在原始测试数据进行球粒

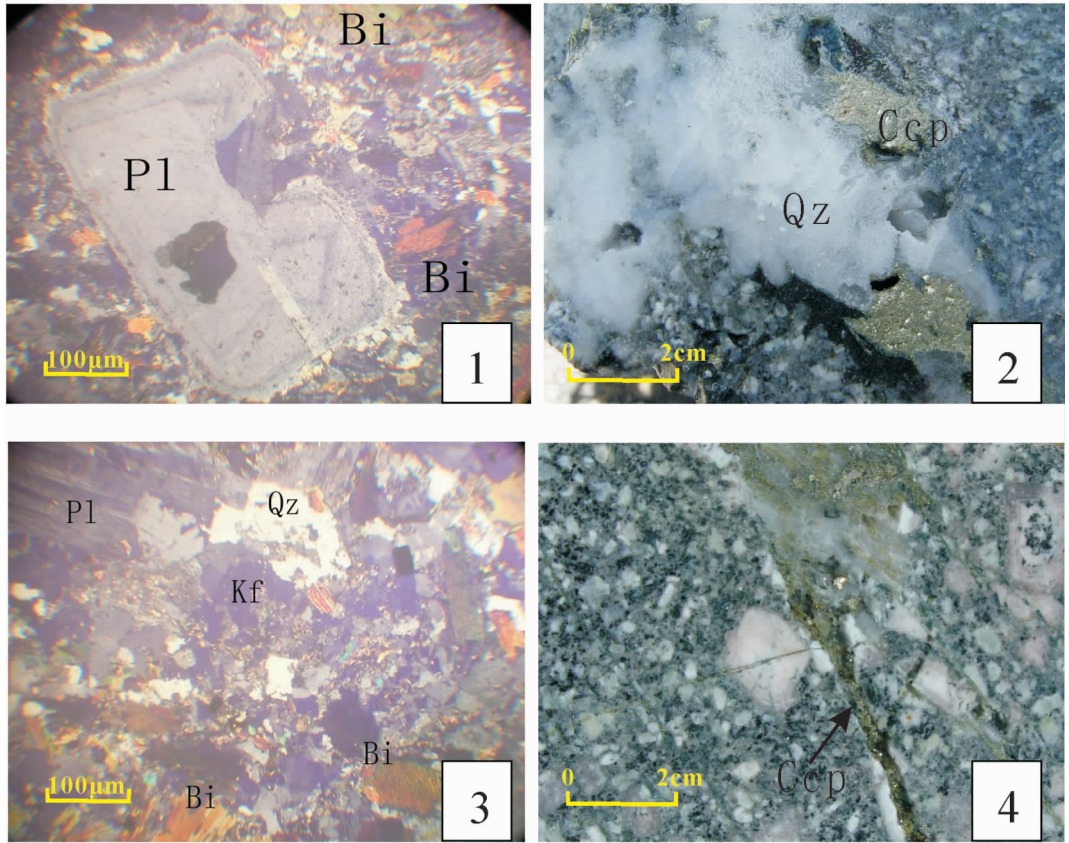


图 2 岩矿石显微照片

1—石英闪长玢岩,斑状结构,基质具半自形粒状结构,斜长石(Pl)斑晶具聚片双晶和环带构造,黑云母(Bi)斑晶呈红褐色片状,正交偏光;2—含铜石英闪长玢岩;3—石英二长斑岩,斑状结构,基质具半自形粒状结构,由钾长石(Kf)、斜长石(Pl)、石英(Qz)、黑云母(Bi)等组成,正交偏光;4—含铜石英二长斑岩

Fig.2 Micrographs of rocks and ores

1—Quartz diorite porphyrite, porphyritic texture, matrix with hypidiomorphic granular texture, plagioclase phenocrysts with polysynthetic twin and zonal structure, biotite phenocrysts showing redish brown flake, crossed nicols; 2—Copper-bearing quartz diorite porphyrite; 3—Quartz monzonite porphyry, porphyritic texture, matrix with hypidiomorphic granular texture, composed of potash feldspar, plagioclase, quartz, biotite etc., crossed nicols; 4—Copper-bearing quartz monzonite porphyry

表 1 普朗斑岩铜矿主元素组成(%)

Table 1 Major element content of the Pulang porphyry copper deposit

样号	4816—1B	4816—1b	4707—B2	4707—B1	PL1—1	PL2—1	2801—1	3601—1	PLSJ—1	YS12
岩石名称	石英闪长玢岩				石英二长斑岩					花岗闪长斑岩
SiO ₂	62.12	62.34	53.39	52.47	61.19	62.86	65.91	62.11	57.11	65.01
TiO ₂	0.75	0.76	1.52	1.56	0.72	0.75	0.45	0.68	0.71	0.76
Al ₂ O ₃	15.27	14.92	14.95	15.19	14.61	14.87	15.12	14.38	14.21	14.8
Fe ₂ O ₃	3.68	2.91	8.27	8.44	6.08	6.05	4.04	4.58	6.47	0.19
MnO	0.04	0.04	0.09	0.09	0.07	0.02	0.03	0.04	0.06	1.6
MgO	3.82	3.26	4.57	4.70	3.85	3.25	1.55	3.12	3.90	0.04
CaO	6.35	6.25	5.38	5.62	5.36	0.41	2.71	5.06	4.95	4.13
Na ₂ O	5.28	4.90	2.60	2.82	2.93	2.18	3.08	3.26	6.81	4.95
K ₂ O	0.23	0.28	4.45	4.53	4.07	7.18	5.13	4.02	4.69	5.66
P ₂ O ₅	0.10	0.36	0.62	0.64	0.41	0.41	0.22	0.40	0.42	1.03
灼减量	1.79	2.98	4.61	4.67	1.28	2.88	1.73	1.92	1.18	1.46
总量	99.42	99.00	100.45	100.73	100.57	100.87	99.98	99.57	100.52	99.62
?	1.54	1.32	4.21	4.97	2.66	4.31	2.90	2.69	9.21	2.34
SI	29.86	29.16	23.54	23.49	23.19	17.69	11.39	21.17	18.07	16.3
DI	61.59	63.33	55.74	55.15	63.02	80.09	78.36	68.06	66.48	69.68

注:数据由贵阳地球化学研究所(2007)测试;4816—1B、4816—1b 具硅化现象。

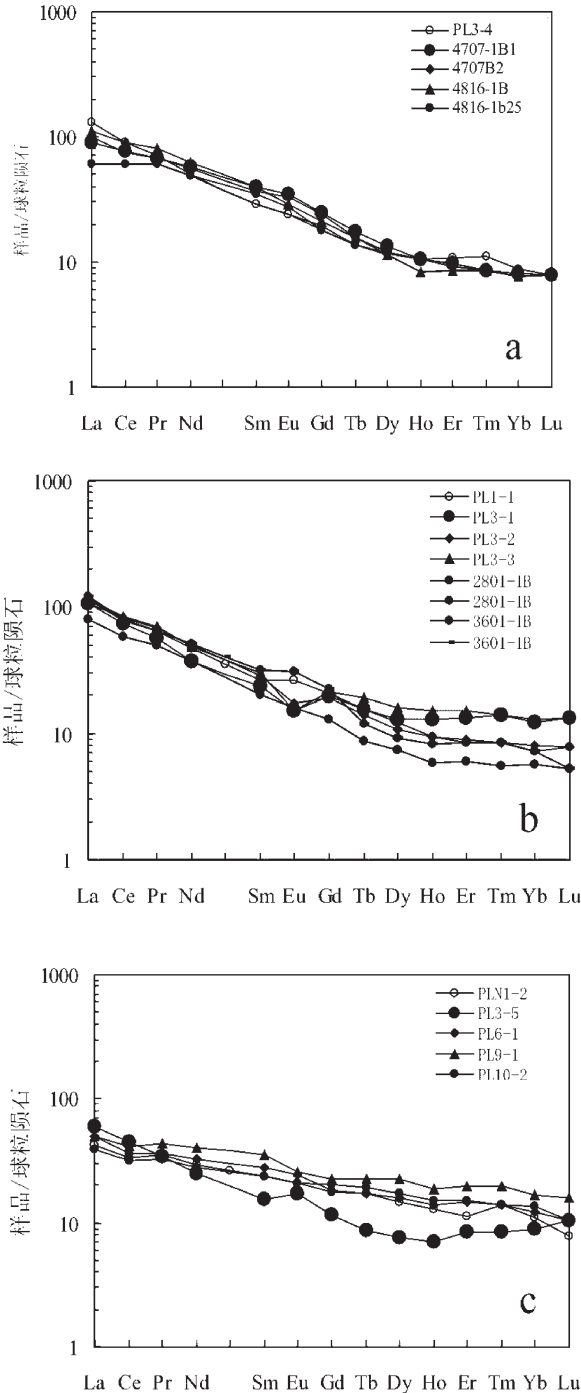


图4 普朗复式岩体稀土元素配分曲线

a—石英闪长斑岩;b—石英二长斑岩;c—花岗闪长斑岩

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of Pulang compound granitic body

a—Quartz diorite porphyrite;b—Quartz monzonite porphyry;
c—Granodiorite porphyry

为无明显 Eu 异常。不同样品的稀土元素总量及分量差异不大,在稀土配分曲线图(图 4-a)上显示基本一致,显示为同源岩浆演化系列。

石英二长斑岩具有中等的稀土元素总量, ΣREE 变化于 $134.9 \times 10^{-6} \sim 217 \times 10^{-6}$, 平均 177.89×10^{-6} , 稀土总量变化较大。LREE/HREE=10.15, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=8.69 \sim 18.1$, 平均为 13.83, 表明轻重稀土分馏明显; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=3.66 \sim 4.53$, 平均 4.04, 轻稀土分馏较强; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.62 \sim 2.99$, 平均 2.08 重稀土分馏轻微, 在稀土配分曲线图上表现为向右中等倾斜的平滑曲线。 $\delta \text{Eu}=0.58 \sim 1.14$, 平均 0.9, 无明显 Eu 异常。不同样品的稀土元素总量及分量差异不大, 在稀土配分曲线图(图 4-b)上显示基本一致。与玢岩相比, 斑岩的 LREE/HREE 和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值相对较高, 反映了斑岩形成是岩浆分异程度相对较高所致。

花岗闪长斑岩具有较低的稀土元素总量, ΣREE 变化于 $99.92 \times 10^{-6} \sim 131.6 \times 10^{-6}$, 平均 109.08×10^{-6} , 稀土总量变化不大。与石英闪长玢岩、石英二长斑岩相比较, 稀土富集程度明显减弱。LREE/HREE=4.48, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=14.09$, 表明轻重稀土分馏明显, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=3.85$, 轻稀土分馏较强, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.44$, 重稀土分馏十分轻微, 在稀土配分曲线图上表现为向右中等倾斜的平滑曲线。 δEu 变化不大, 平均 1.0。不同样品的稀土元素总量及分量差异不大, 在稀土配分曲线图(图 4-c)上显示基本一致。

普朗矿区含矿岩石的微量元素特征表明, 石英闪长玢岩中 Pb、Zn 含量较高; 石英二长斑岩中 Cu 明显富集, Mo、Pb、Zn 也比较高; 花岗闪长斑岩中 Ni、V 含量较高; 安山岩和泥质板岩中微量元素的含量普遍较低。玢岩和斑岩相比, 前者 $\Sigma \text{Ce}/\Sigma \text{Y}$ 和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 较大, 反映斑岩形成时岩浆分异程度较高。斑(玢)岩的微量元素分布与中酸性火山岩和弧型花岗岩非常相似^[5,10,21-22], 富集 Ba、La、Rb、Sr、K 和亲铜元素 Cu、Pb 及亲铁元素 Mo、Ni, 亏损 Nb、Zr、Hf、Ti。玢(斑)岩与区内中酸性火山岩在主元素、稀土元素及其他微量元素的含量及组成上的相似性表明, 两者具有相同或相近的岩浆源岩。斑(玢)岩与岛弧花岗岩的岩石系列相同, 属钙碱性岩系, 成因类型一致, 属 I 型花岗岩。在 SiO_2 含量相同的情况下, 斑(玢)岩的 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 等含量相对偏低^①。

①西南三江南段找矿重大疑难问题研究报告. 云南省地质调查院, 2008.

3.4 S、Pb 同位素特征

关于 $\delta^{34}\text{S}$ 来源的判定有 3 种不同的解释:幔源硫,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 $0\pm 3\text{‰}$;现代海水硫,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+20\text{‰}$ 左右;具有 $\delta^{34}\text{S}$ 大的负值的强烈还原(沉积的)硫^[23]。矿区中黄铜矿(铜矿石)分析结果表明,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-0.49\text{‰}\sim -4.62\text{‰}$ 、 $1.35\text{‰}\sim 1.97\text{‰}$,变化范围较窄,具有较高的均一性,平均为 -0.26‰ ,接近 0,说明矿石中组成黄铜矿、黄铁矿的硫为幔源硫,表明该矿床硫具有很均一的来源,为幔源硫特征。

通过分析普朗复式岩体的初始铅同位素组成,可以为判断其物质来源提供依据,也是研究火山弧岩浆起源和演化的有效手段。黄铜矿同位素分析结果(表 3)显示: $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}$ 为 $18.004\sim 18.769$ 、 $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204}$ 为 $15.563\sim 15.773$ 、 $\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{204}$ 为 $38.585\sim 39.654$ 、 ϕ 值为 $0.574\sim 0.617$ 、 μ 值为 $9.34\sim 9.63$ 、Th/U 比值为 $3.67\sim 4.04$ 。在 $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}-\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204}$ 、 $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}-\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{204}$ 图中除 1 件样品为放射性成因的铅外,大部分落入正常铅范围,铅同位素主要集中于造山带演化线一侧以及下地壳(图 5)。

此外,对普朗铜矿中伴生的 Au、Pd、Pt 含量分析结果表明,Au 的平均含量为 0.18 g/t ,Pd 的平均含量为 1.52×10^{-9} ,Pt 的平均含量为 3.56×10^{-9} ,与国外典型斑岩铜矿床一样,均伴生有较高的金、铂、钯元素。铂族元素来自上地幔和下地壳,斑岩铜矿中大量金、铂、钯等的聚集,表明成矿物质来自上地幔和下地壳^[25]。因此,普朗斑岩铜矿床的成矿岩浆及成矿物质来自上地幔和下地壳,属壳幔混源。

4 成岩成矿构造环境及演化

4.1 花岗岩构造环境判别

本文综合应用 Pearce 等人(1984)花岗岩类型的大地构造环境判别分类(Rb-Y-Nb、Rb-Yb-Ta、

表 3 普朗铜矿床铅稳定同位素数据

Table 3 Pb stable isotope data of the Pulang copper deposit

矿物	分析结果			ϕ	μ	Th/U	表面年龄/Ma
	$\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}$	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204}$	$\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{204}$				
黄铜矿	18.004 ± 0.005	15.657 ± 0.006	38.616 ± 0.021	0.617	9.63	4.04	525
	19.165 ± 0.005	15.569 ± 0.002	39.248 ± 0.011	0.535	9.34	3.67	-446
	18.195 ± 0.002	15.566 ± 0.003	38.488 ± 0.013	0.593	9.42	3.86	282
	18.288 ± 0.006	15.603 ± 0.003	38.671 ± 0.008	0.591	9.48	3.9	259
	18.769 ± 0.027	15.773 ± 0.028	39.654 ± 0.084	0.579	9.77	4.04	123
	18.589 ± 0.018	15.639 ± 0.019	38.847 ± 0.060	0.576	9.52	3.82	85.6
黄铁矿	18.486 ± 0.002	15.563 ± 0.001	38.585 ± 0.002	0.574	9.38	3.75	64.1
	18.152 ± 0.006	15.569 ± 0.004	38.258 ± 0.016	0.596	9.43	3.79	316
	17.680 ± 0.007	15.453 ± 0.006	37.730 ± 0.012	0.616	9.26	3.79	520

注:由国土资源部中南矿产资源监督检测中心测试,2009。

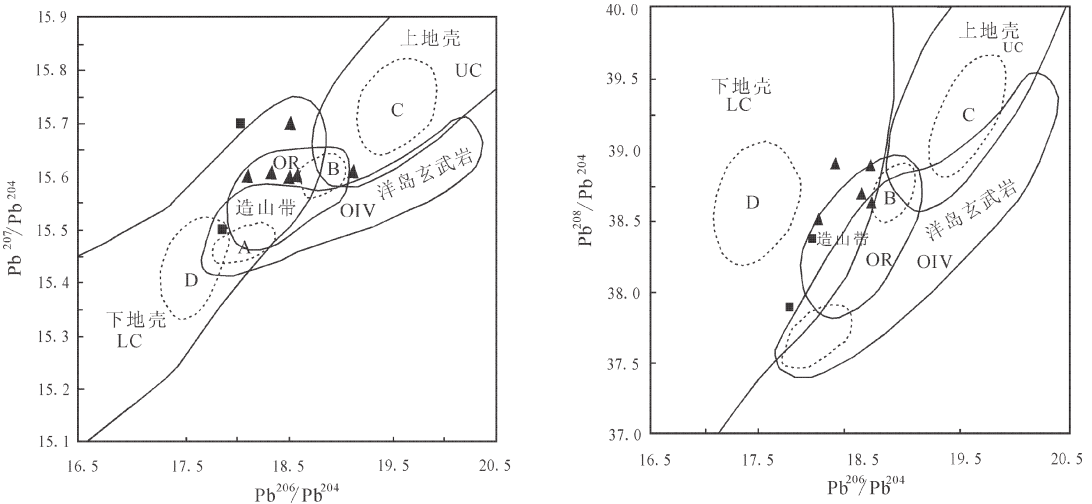


图 5 铅同位素 $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}-\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204}$ 、 $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}-\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{204}$ 构造环境判别图解(据 Allegre CJ, 1977)

LC—地壳;UC—上地壳;OIV—洋岛火山岩;OR—造山带;A、B、C、D 分别为各区中样品的相对集中区

Fig.5 $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}-\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204}$ 、 $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}-\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{204}$ tectonic environment discrimination diagram (after Allegre C J, 1977)

LC—Lower crust; UC—Upper crust; OIV—Ocean island volcanics; OR—Orogenic belt. A, B, C, D show relative concentration areas of the districts.

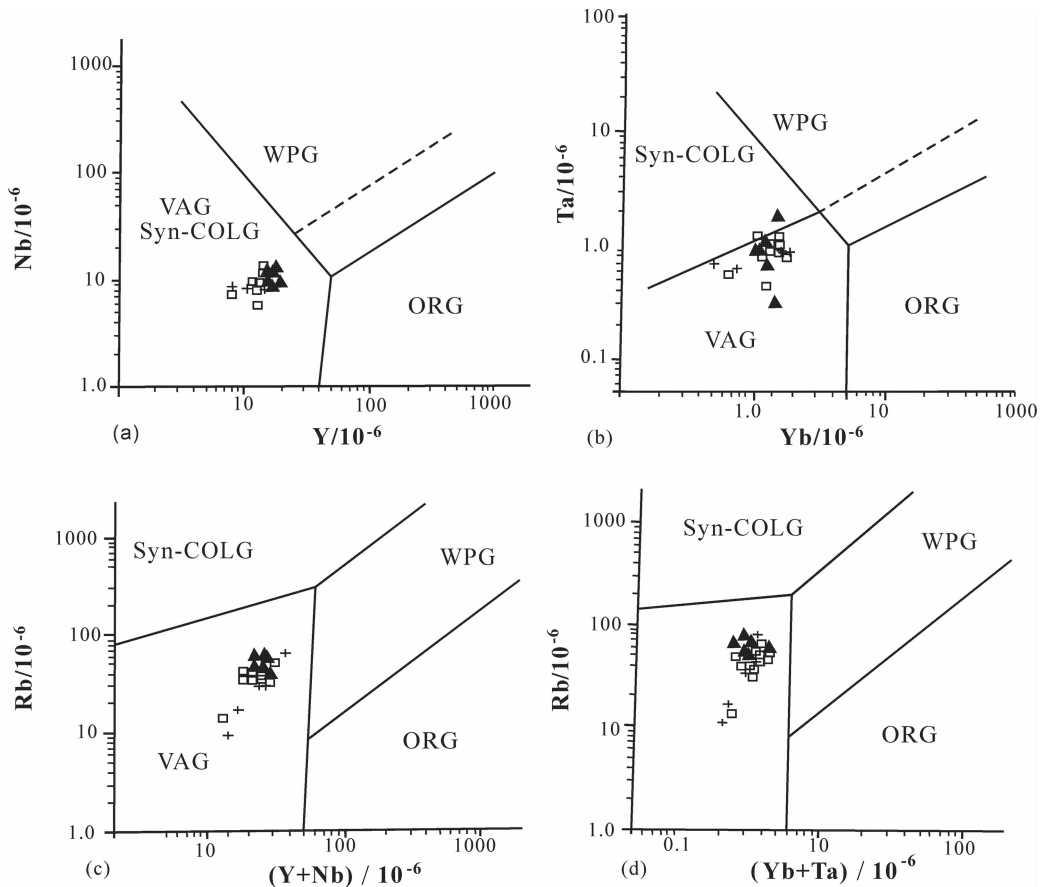
Hf-Rb-Ta 判别图解), 利用花岗岩类主要的微量元素对普朗复式岩体的成岩构造环境进行了判别。元素 Rb、Y(Yb)、Nb(Ta) 是被选择区分大洋脊花岗岩 (ORG)、火山弧花岗岩 (VAG)、板内花岗岩 (WPG) 和碰撞带花岗岩 (Syn-COLG) 等大多数类型最为有效的判据^[26]。将普朗复式岩体主要岩石的相差元素投影到 Rb-Y-Nb 和 Rb-Yb-Ta 判别图解(图 6), 结果绝大多数样点落入火山弧花岗岩 (VAG) 的范围内。根据主要岩石的岩石学特征、微量元素特征判别普朗复式岩体的成岩构造环境为火山弧环境。

4.2 普朗复式岩体成岩的大地构造背景

普朗复式斑(玢)岩体出露于义敦岛弧南端的格咱岛弧, 空间上与钙碱性系列的岛弧火山岩共生, 矿

物学和岩石学特征、地球化学特征显示斑岩具火山弧花岗岩类特征, S、Pb 同位素组成特征表明斑岩的源岩来自壳幔混源, 上地壳或陆源成分混入程度较轻。普朗复式岩体斑(玢)岩体的形成与义敦岛弧尤其是格咱岛弧的发展演化密切相关。

格咱岛弧在结构及时空演化上保持了义敦岛弧的共性, 即在格咱地区广泛分布上三叠统火山沉积岩系, 主要发育岛弧钙碱性安山岩-英安岩系, 并被稍晚浅成-超浅成中酸性岩侵入, 构成了典型的火山-岩浆岩带。早三叠世格咱地区处于甘孜-理塘洋盆的被动大陆边缘, 晚三叠世中晚期 (235~210 Ma) 洋壳向德格-中甸陆块 B 型俯冲, 中甸褶皱带转化为活动大陆边缘。由东向西, 沿俯冲方向在北段



ORG为洋中脊花岗岩; VAG为火山弧花岗岩; WPG为板内花岗岩; Syn-COLG为同构造的碰撞带花岗岩; ▲-石英闪长玢岩; □-石英二长斑岩; + -花岗闪长斑岩

图 6 花岗岩构造环境判别图解

a—花岗岩 Y-Nb 判别图解; b—花岗岩 Yb-Ta 判别图解; c—花岗岩 (Yb+Nb)-Rb 判别图解; d—花岗岩 (Yb+Ta)-Rb 判别图解(据 Pearce 等, 1984)

Fig.6 Discrimination diagram of granite tectonic environment

a-Granite Y-Nb diagram; b-Granite Yb-Ta diagram; c- Granite (Yb+Nb)-Rb diagram; d-Granite (Yb+Ta)-Rb diagram (after Pearce, 1984)

发育昌台弧,中部发育乡城弧,南端为格咱岛弧和格咱弧后盆地,组成沟-弧-盆体系^[4]。晚三叠世末,甘孜-理塘洋盆消亡,经短暂的残留海发育阶段,最后碰撞造山,产生强烈的构造变形、变质及花岗岩浆侵入活动。在变弧造山环境,消减带板片的撕裂不仅导致俯冲角度缓,也诱发了地壳耦合变形,产生切弧断裂,诱发俯冲板块的部分熔融,产生含矿岩浆形成低密度和低粘度初熔带^[3,27]。岩浆底辟上升和分凝形成钙碱性岩浆,继之结晶分异上涌或侵位形成钙碱性岛弧火山岩-浅成-超浅成中酸性玢(斑)岩系,即原始岛弧岩浆岩。

据李文昌^[9]Ar-Ar 法测年研究表明,石英闪长玢岩的成岩年龄约为 212.1 Ma,石英二长斑岩的成岩(矿)年龄为(211.6±2.4) Ma,花岗闪长斑岩的形成年龄为(204.1±9.2)Ma。普朗复式岩体的成岩成矿作用主要发生在印支期末期,大体终止于燕山早期,属中

生代早期岩浆作用的结果。从格咱岛弧活动的时段(203~250 Ma)分析,普朗复式斑(玢)岩体的活动时段与甘孜-理塘洋壳的俯冲时限相近。在格咱地区由于俯冲角度的变缓,形成压性构造应力场,原生岛弧钙碱性岩浆发生多阶段分离结晶作用和矿物集合体(Ol+Cpx+Plag+Hb)堆积完成,堆积成分相当于辉长岩。在上下地壳界面,钙碱性岩浆的堆积相主要为Plag+Cpx+Hb+Mt,其成分相当于中性-中基性岩,由于温度压力条件的变化,岩浆向上运移并喷出或侵位,形成中酸性的火山岩或斑(玢)岩,并产出了斑岩型铜多金属矿床^[14,28]。

5 成矿作用初探

成矿系统是控制矿床形成、变化、保存的全部地质要素和成矿作用动力学过程,及所形成的矿床系列、矿化异常系列构成的整体,是具有成矿功能的自

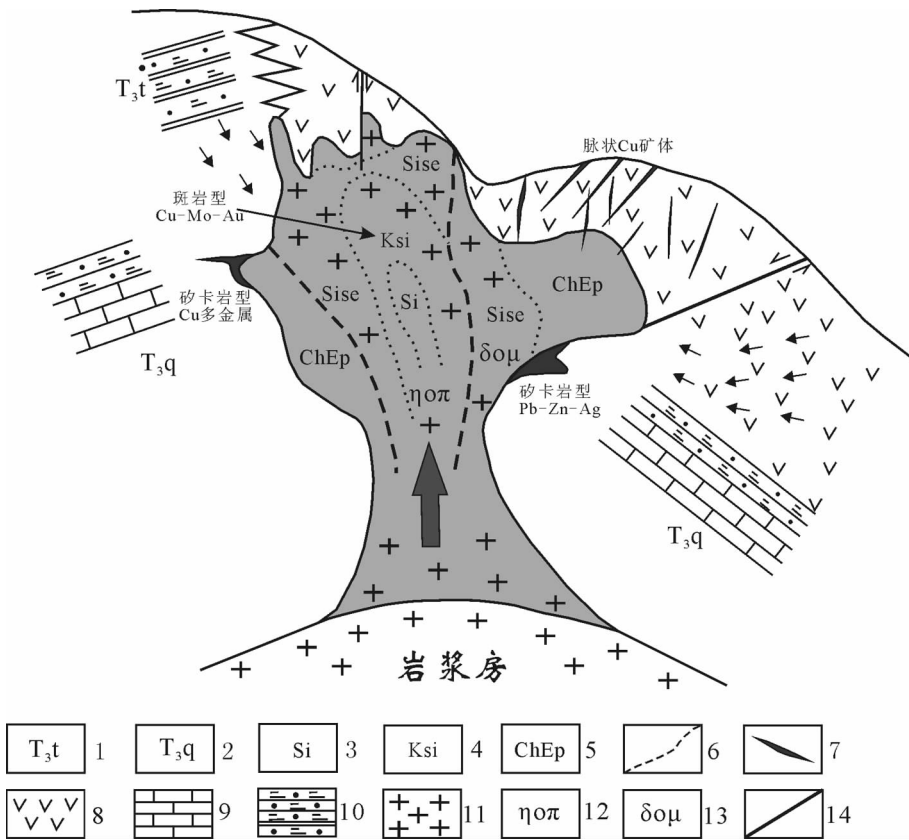


图 7 普朗斑岩型铜矿成矿模式图

1—上三叠统图姆沟组;2—上三叠统曲嘎寺组;3—硅化带;4—钾化带;5—青磐岩化带;6—岩性分界线;
7—矿体;8—中性火山岩;9—灰岩;10—砂岩板岩;11—花岗岩;12—石英二长斑岩;13—石英闪长玢岩;14—断层

Fig.7 Metallogenetic model of the Pulang porphyry copper deposit

1—Upper Triassic Tumugou Formation;2—Upper Triassic Qugasi Formation;3—Silicified belt;4—Potassic alteration belt;5—Propylitization belt;6—Lithologic boundary;7—Ore body;8—Intermediate volcanic rocks;9—Limestone; 10—Sandstone and slate;11—Granite;12—Quartz monzonite porphyry;13—Quartz diorite porphyrite;14—Fault

然系统^[20]。中甸岛弧成矿系统由晚三叠世地层(含火山岩)、中酸性侵入岩和构造 3 大要素组成,三者密不可分,是构造演化的具体表现或产物,其共同制约了斑(玢)岩成矿作用系统,在不同条件、不同部位形成了不同类型矿床,构成了本区特有的斑(玢)岩成矿系列。

二叠纪末期甘孜—理塘洋盆打开,早三叠世开始强烈扩张。晚三叠世晚期洋壳沿甘孜—理塘海沟向西俯冲消减于中甸—中甸微陆块之下,源自俯冲板片的脱水流体对地幔源区的交代作用,诱发幔岩的熔融,也引发了岛弧地壳的耦合变形,形成岛弧断裂,这为后期岩浆和成矿物质的上涌提供了良好的通道。幔源物质底辟上升和岩浆分凝形成钙碱性岩浆,岩浆分异上涌或侵位形成钙碱性岛弧火山岩—浅成—超浅成中酸性斑(玢)岩系,即岛弧岩浆岩。

普朗矿区发育的 NNW 向的黑水塘断裂与 NE 向的全力达断裂控制了普朗复式岩体的侵位和产出,早期的石英闪长玢岩沿两断裂的交汇部位侵入,中期的石英二长斑岩主要沿北北西向的黑水塘断裂侵入就位,基本沿早期单元北北西翼的中轴线分布,呈宽 100~500 m 的条带状展布。晚期单元花岗闪长斑岩主要沿北东向展布的全力达断裂侵入就位,基本沿早期单元北东翼的中轴线分布,二者在岩体中部交汇,整体呈“Y”形。

岩体侵位后,断裂仍处于活动期,来自上地幔和下地壳的成矿热液同样沿黑水塘断裂及全力达断裂汇聚、运移并扩散。过渡性岩浆过程产生挥发分,在临界—超临界状态,形成富含 Cu、Fe 及 S、I、F、B、CO₂、H₂O 的碱金属络合物和重金属络合物。当成矿流体与碳酸盐围岩发生交代反应,可形成矽卡岩,并在其后的含矿流体活动中,形成矽卡岩型矿体;当流体集聚于岩体的顶部,流体内压不断加大,形成内爆发型角砾破碎带,产生网脉状破裂系统和爆破角砾岩筒,溶于成矿热液中的金属络合物开始分解,并沉淀富集形成网脉状矿化和矿化蚀变(图 7)。

致谢:本文是综合多个项目的研究成果,在此向在该地区辛勤工作过的地质专家学者一致表示诚挚的感谢!衷心感谢审稿专家对本文提出的宝贵建议!

参考文献(references):

[1] 莫宣学, 路凤香, 沈上越, 等. “三江”特提斯火山作用与成矿[M]. 北京:地质出版社, 1993:58-64.

- Mo Xuanxue, Lu Fengxiang, Shen Shangyue, et al. Sangjiang Tethyan volcanism and Related Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:58-64(in Chinese).
- [2] 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 等. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录[J]. 地质学报, 2001, 75(4):17-24.
Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Zhou Jirong, et al. Collision - Orogenic processes of the Yidun arc in the Sanjiang region: record of granites[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(4):17-24(in Chinese with English abstract).
- [3] 侯增谦, 杨岳清, 曲晓明, 等. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统[J]. 地质学报, 2004, 13(1):109-120.
Hou Zengqian, Yang Yueqing, Qu Xiaoming, et al. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun arc orogen in Sangjiang region, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 13(1):109-120 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李文昌. 义敦岛弧构造演化与普朗超大型斑岩铜矿成矿模型[D]. 北京:中国地质大学, 2007.
Li Wenchang. The Tectonic evolution of the Yidun island arc and the metallogenic model of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan, SW China [D]. Beijing: China University of Geoscience, 2007(in Chinese with English abstract).
- [5] 曾普胜, 李文昌, 王海平, 等. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿: 岩石学及年代学特征[J]. 岩石学报, 2006, 22(4):989-1000.
Zeng Pusheng, Li Wenchang, Wang Haiping, et al. The Indosinian Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China: petrology and chronology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(4): 989-1000(in Chinese with English abstract).
- [6] 莫宣学, 邓晋福, 董方浏, 等. 西南三江造山带火山岩—构造组合及其意义[J]. 高校地质学报, 2001, 7(2):121-138.
Mo Xuanxue, Deng Jinfu, Dong Fangliu, et al. Volcanic petrotectonic assemblages in Sanjiang orogenic belt, SW China and implication for tectonics[J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(2):121-138 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李文昌, 莫宣学. 西南“三江”地区新生代构造及其成矿作用[J]. 云南地质, 2001, 20(4):333-346.
Li Wenchang, Mo Xuanxue. The Cenozoic tectonics and metallogenesis in the “three-river” area of southwest China [J]. Yunnan Geology, 2001, 20(4):333-346(in Chinese with English abstract).
- [8] 李文昌, 曾普胜. 云南普朗超大型斑岩铜矿特征及成矿模型[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(4):436-446.
Li Wenchang, Zeng Pusheng. Characteristics and metallogenic model of the Pulang superlarge porphyry copper deposit in Yunnan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology, 2007, 34(4):436-446(in Chinese with English abstract).
- [9] 李文昌, 尹光候, 卢映祥, 等. 中甸普朗复式斑岩体演化及 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素依据[J]. 地质学报, 2009, 83(10):1421-1429.
Li Wenchang, Yin Guanghou, Lu Yingxiang, et al. The Evolution and ⁴⁰Ar-³⁹Ar Isotopic Evidence of the Pulang Complex in Zhongdian[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(10):1421-1429 (in

- Chinese with English abstract).
- [10] 曾普胜, 莫宣学, 喻学忠, 等. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[J]. 矿床地质, 2003, 22(4):393-400.
Zeng Pusheng, Mo Xuanxue, Yu Xuezhong, et al. Porphyries and porphyry copper deposits in Zhongdian area, northwestern Yunnan [J]. *Mineral Deposits*, 2003, 22(4):393-400 (in Chinese with English abstract).
- [11] 谭康华, 李光军, 黄定柱, 等. 普朗大型斑岩铜矿控矿条件[J]. 云南地质, 2005, 24(2):167-174.
Tan Kanghua, Li Guangjun, Huang Dingzhu, et al. The ore-controlling conditions of large scale Pulang porphyry copper deposit[J]. *Yunnan Geology*, 2005, 25(2):167-174(in Chinese with English abstract).
- [12] 李光军, 谭康华, 张世权, 等. 普朗铜矿找矿标志及找矿模型[J]. 云南地质, 2005, 24(2):175-185.
Li Guangjun, Tan Kanghua, Zhang Shiquan, et al. The ore-prospecting index and model of Pulang Cu deposit [J]. *Yunnan Geology*, 2005, 24(2):175-185(in Chinese with English abstract).
- [13] 范玉华, 李文昌. 云南普朗斑岩铜矿床地质特征 [J]. 中国地质, 2006, 33(2):352-362.
Fan Yuhua, Li Wenchang. Geological characteristics of the Pulang porphyry copper deposit, Yunnan [J]. *Geology in China*, 2006, 33(2):352-362(in Chinese with English abstract).
- [14] 杜杨松, 庞振山, 王功文, 等. 云南省普朗铜矿成矿规律与成矿预测研究[R]. 中国地质大学, 2007.
Du Yangsong, Pang Zhenshan, Wang Gongwen, et al. Metallogenic regularities and predictions of Pulang copper deposit, Yunan [R]. *China University of Geosciences in Beijing*, 2007(in Chinese).
- [15] 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 等. 三江提特斯复合造山与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1):38-42.
Deng Jun, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, et al. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Snajiang Tethys [J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(1):38-42(in Chinese with English abstract).
- [16] 赵文津. 大型斑岩铜矿成矿的深部构造岩浆活动背景[J]. 中国地质, 2007, 34(2):179-204.
Zhao Wenjin. Deep tectono-magmatic setting for metallogenesis of large porphyry copper deposits [J]. *Geology in China*, 2007, 34(2):179-204(in Chinese with English abstract).
- [17] 曹殿华, 王安建, 李文昌, 等. 普朗斑岩铜矿岩浆混合作用: 岩石学及元素地球化学证据[J]. 地质学报, 2009, 83(2): 166-175.
Cao Dianhua, Wang Anjian, Li Wenchang, et al. Magma mixing in the Pulang porphyry copper deposit: Evidence from petrology and element geochemistry [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(2): 166-175 (in Chinese with English abstract).
- [18] 庞振山, 杜杨松, 王功文, 等. 云南普朗复式岩体地质地球化学特征及成因[J]. 地质通报, 2009, 28(4):531-537.
Pang Zhenshan, Du Yangsong, Wang Gongwen, et al. Geological and geochemical feature and petrogenesis of Pulang complex, Yunan Province, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(4):531-537(in Chinese with English abstract).
- [19] 杨岳清, 侯增谦, 黄典豪, 等. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统[J]. 地球学报, 2002, 23(1):17-24.
Yang Yueqing, Hou Zengqian, Huang Dianhao, et al. Collision orogenic process and magmatic metallogenic system in Zhongdian arc [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23 (1):17-24 (in Chinese with English abstract).
- [20] Middlemost Eric A.K. Naming materials in the magma/igneous rocksystem[J]. *Earth-Science Review*, 1994, 37:215-224.
- [21] 王守旭, 张兴春, 冷成彪, 等. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿床地球化学与成矿机理初探[J]. 矿床地质, 2007, 26(3):277-288.
Wang Shouxu, Zhang Xingchun, Leng Chengbiao, et al. A tentative study of ore geochemistry and ore-forming mechanism of Pulang porphyry copper deposit in Zhongdian, northwestern Yunnan [J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26 (3):277-288 (in Chinese with English abstract).
- [22] 胡清华, 张世权, 尹静, 等. 中甸普朗斑岩型铜矿床围岩蚀变初步研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(02):192-201.
Hu Qinghua, Zhang Shiquan, Yin Jing, et al. A study of wall-rock alteration in the Zhongdian Pulang porphyry copper deposit [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2010, 29(02): 192-201 (in Chinese with English abstract).
- [23] 郑淑惠, 郑斯成, 莫志超. 稳定同位素地球化学分析 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1986.
Zheng Shuhui, Zheng Sicheng, Mo Zhichao. *The Analysis of Stable Isotope Geochemistry* [M]. Beijing: Peking University Press, 1986 (in Chinese).
- [24] Allege C J, Treuil M, Minster J F, et al. Systematic use of trace element in igneous process: Part I, fractional crystallization processes in volcanic suites [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1977, 60(1):57-75.
- [25] 芮宗瑶, 黄崇轲, 齐国明, 等. 中国斑岩铜(钼)矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1984:67-76.
Rui Zongyao, Huang Chongke, Qi Guoming, et al. *Porphyry Copper (molybdenum) Deposit of China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984:67-76(in Chinese).
- [26] Pearce J A, Harris H B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4):956-983.
- [27] 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等. 云南中甸地区两个斑岩铜矿容矿斑岩地球化学特征[J]. 矿物学报, 2007, 27(3):414-421.
Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Shouxu, et al. Geochemical characteristics of porphyry copper deposits in Zhongdian area, Yunnan as exemplified by the Xuejiping and Pulang porphyry copper deposits [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 27(3):414-421(in Chinese with English abstract).
- [28] 李文昌, 潘桂堂, 侯增谦, 等. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 2010:379-391.
Li Wenchang, Pan Guitang, Hou Zengqian, et al. *Sanjiang*

Multiple Island arc-Collisional Orogeny Metallogenic Theory and Exploration Techniques in Southwest of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010:379-391(in Chinese).
 [29] 翟裕生, 彭润民, 向运川, 等. 区域成矿研究方法[M]. 武汉: 中国

地质大学出版社, 2004:15.

Zhai Yusheng, Peng Runming, Xiang Yunchuan, et al. Regional Metallogeny Method[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004:15 (in Chinese).

The characteristics of metallogenic rocks in the Pulang porphyry copper deposit of Yunnan Province

LI Wen-chang^{1,2}, LIU Xue-long^{1,2}, ZENG Pu-sheng³, YIN Guang-hou²

(1. Faculty of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Yunnan Geological Survey, Kunming 650051, Yunnan, China; 3. China metallurgical geology bureau, Beijing, 100025, China)

Abstract: The Pulang porphyry copper deposit is a typical Indo-Chinese porphyry copper deposit in Zhongdian area, hosted in southern composite body of the Yidun structural-magmatic belt. The composite rock body is a hypabyssal-ultrahypabyssal intermediate-acid porphyry (porphyrite) body, which can be divided into three invasion stages, i.e., quartz diorite porphyrite, quartz monzonite porphyry, and granodiorite-porphyry. Geochemical characteristics show that the rocks are enriched with Ba, La, Rb, Sr, K, chalcophile elements Cu, Pb, and siderophile elements Mo, Ni, and are depleted in Nb, Zr, Hf and Ti. Porphyry (porphyrite) is the same as the rock series of granite island, belonging to calc-alkaline suite, and their genetic types are also similar to each other, belonging to I-type granite. The ore bodies are controlled by structures. The porphyry copper deposit mainly occurs in the Indo-Chinese intermediate-acid porphyry (porphyrite), and the mineralization was controlled by such factors as magmatic rocks, emplacement formation, uranium migration, hydrothermal alteration and structural space, which jointly constituted a porphyry metallogenic system characterized by the structural-magmatic-hydrothermal coupling in Indo-Chinese period.

Key words: porphyry copper deposit; geochemical characteristics; mineralization; metallogenic system; Pulang; Yunnan

About the first author: LI Wen-chang, male, born in 1962, senior engineer, professor and supervisor of doctor candidates, mainly engages in exploration of mineral resources and mangment; E-mail: lwenchangynddy@163.com.