云南省格咱岛弧印支期岩浆演化及普朗斑岩型铜矿成矿作用

刘学龙[1,2)]，李文昌[1,2)]，尹光侯[2)]，张娜[3)]

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，昆明，650051；
3)金川集团有限公司，甘肃金昌，737100

内容提要：格咱岛弧位于西南三江构造火成岩带义敦岛弧南端，是晚三叠世甘孜-理塘洋壳向德格-中甸陆块俯冲的产物，是我国近年来新发现的重要铜多金属成矿带。该区强烈的构造-岩浆活动贯穿于岛弧造山作用的始终，丰富的成矿作用发育于岛弧造山的不同时代、不同环境，产出了普朗、雪鸡坪等大型铜多金属矿床。其中普朗斑岩型铜矿是印支期斑岩铜矿的典型代表，其含矿斑岩体 SiO_2 含量在 60.07%～65.78%，属于中酸性岩。Al_2O_3 含量为 14.80%～15.97%，(K_2O+Na_2O)为 5.79%～10.99%，K_2O/Na_2O 为 0.7～1.14，里特曼指数(σ)为 1.02～1.9，固结指数(*SI*)为 7.65～24.77，分异指数(*DI*)为 61.17～70.58，岩石属钙碱性系列，岩浆分异一般较好。A/CNK 为 0.74～0.981，平均为 0.87，岩石属准铝质花岗岩。锆石 U-Pb 同位素测年结果表明，石英闪长玢岩的形成年龄大致在 220.8±4.1Ma，普朗石英二长斑岩的形成年龄为 214.8±3.5Ma，其成岩成矿时代主要集中于印支期。

关键词：岛弧岩浆岩；斑岩型铜矿；成矿作用；印支期；格咱岛弧；云南

洋壳的俯冲(B型)，一般导致岛弧造山带的发育，火山岩浆弧是构成俯冲造山带的主体，其典型的成矿作用主要形成“黑矿型”块状硫化物矿床(Franklin et al.，1981；Ohmoto et al.，1983；Lydon，1988)，如“呷村”超大型 Zn-Pb-Cu 块状硫化物矿床(侯增谦等，2004)；斑岩型铜矿(Silitoe et al.，1972)，如普朗斑岩铜矿(李文昌，2007a，2010a；范玉华等，2006)，以及浅成低温热液型金矿(Simon et al.，1999；Richard，2010)，如农都柯 Au-Ag 多金属矿床。位于中国西南三江地区的义敦岛弧碰撞造山带是西藏喜马拉雅巨型造山带东部的一个复合造山带，它始于印支晚期的大规模洋壳俯冲(210～235 Ma)，其后经历了燕山期的碰撞造山过程(80～88 Ma)，最后又遭受了新特提斯时期的陆内汇聚(28～65 Ma)和大规模剪切平移作用的叠加改造(侯增谦等，2001；杨岳清等，2002)。

格咱岛弧是西南三江构造岩浆岩带中义敦岛弧的重要组成部分，位于义敦岛弧带的南端，是我国近年来新发现的铜多金属矿集区，分布有普朗超大型斑岩型铜矿、雪鸡坪中型斑岩型铜矿、红山大型矽卡岩-斑岩型铜矿等。格咱岛弧在结构及时空演化上保持了义敦岛弧的共性(侯增谦等，1991；曾普胜等，2003)，即在格咱弧广泛分布上三叠统火山-沉积岩系。格咱地区在早三叠世处于甘孜-理塘洋盆西侧的被动大陆边缘，晚三叠世中晚期洋壳向西俯冲，俯冲洋壳在格咱地区由于俯冲角度变缓，从而形成了挤压性的岛弧，并产出了与压性构造环境有关的斑岩型铜矿床；而在义敦岛弧北端由于俯冲速度较快，角度较陡，形成张性弧，并产出了与张性环境有关的块状硫化物矿床(莫宣学等，1993，2001；侯增谦等，2001；李文昌等，2001，2007b)。

甘孜-理塘洋壳俯冲的高峰时间在三叠世晚期，在岛弧造山环境中，大洋俯冲板片的撕裂(slab tear)不仅导致俯冲角度变缓，而且引起弧地壳藕合变形，产生切弧断裂，诱发大洋板片熔融，产生含矿岩浆(侯增谦等，2004；冷成彪等，2007；李文昌等，2007b，2010a)。该区强烈的构造-岩浆活动贯穿于岛弧造山作用的始终，丰富的成矿作用发育于岛弧

注：本文为国家重点基础研究发展计划 973 课题“巨型矿床的变化与保存”(2009CB421007)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011PY0154)“云南中甸格咱岛弧斑岩成矿系统研究、滇西北地区斑岩成矿系统研究与靶区优选”项目共同资助的成果。
收稿日期：2012-02-06；改回日期：2012-11-06；责任编辑：郝梓国，黄敏。
作者简介：刘学龙，男，1983 年生。博士研究生，矿床学专业，主要从事云南“三江”地区的地质矿产研究工作。Email：xuelongliu@foxmail.com。通讯作者：李文昌，男，1962 年生。教授，博士生导师，主要从事云南省地质矿产勘查与研究工作。Email：Lwenchangynddy@163.com。

造山的不同环境，因此是研究岛弧岩浆岩及成矿作用的有利场所。本文在前人研究的基础上，应用岩石地球化学、同位素年代学的研究方法，对格咱岛弧带的地球化学特征进行了系统的研究与总结，并结合对印支期普朗典型斑岩型铜矿床成岩成矿时代的厘定，对印支期格咱岛弧的成矿作用进行了探讨。

1 地质背景

该区地处甘孜-理塘结合带西侧的德格-中甸陆块东缘，西以金沙江断裂带为界，印支期义敦岛弧带南端，总体呈 NNW 向展布(图 1)。晚古生代碳酸岩台地发育，二叠纪末—早三叠世随着东侧甘孜-理塘洋盆的发育并转变为被动大陆边缘，中三叠世末—晚三叠世初随着甘孜-理塘洋壳向西俯冲形成主动大陆边缘。晚三叠世为岩浆弧发展阶段，该区发育了一套巨厚的碎屑岩-碳酸盐岩-火山岩建造，岩性主要为砂板岩夹灰岩、安山玄武岩-安山岩、英安岩，划分为曲嘎寺组(T_3q)、图姆沟组(T_3t)、喇嘛垭组(T_3lm)，是区内印支期—燕山早期浅成中—酸性矿化斑岩的直接围岩。区内 NW 向属早期拉张型断裂，NW 向及近 NE 向断裂控制了印支晚期挤压型钙碱性系列钾质中—酸性火山岩，并有大量的同源中酸性浅成斑(玢)岩分布。

对区内有重大影响的构造运动主要有 3 期：中三叠世—晚三叠世早期，甘孜-理塘小洋盆停止扩张并开始向西俯冲消减，在格咱形成不成熟岛弧，发育了曲嘎寺组以安山玄武岩为主的中基性火山-沉积岩系，中晚期洋盆继续向西俯冲，使格咱岩浆弧进一步发展为成熟岛弧，发育了图姆沟组以安山岩、英安岩为主的中酸性火山-沉积岩系；晚三叠世晚期洋盆封闭，在格咱一带发生同熔型中性—中酸性岩浆活动，伴随有斑岩型、斑岩-矽卡岩复合型及矽卡岩型等重要的铜金多金属矿化。侏罗—白垩纪为陆内汇聚阶段，晚期发育碰撞(S)型酸性岩浆侵入，伴有铜、钼、钨矿化，在构造活动强烈区伴有较强的变质作用及有关矿化。喜马拉雅早期本区主要表现为陆内伸展裂陷，发育正长(斑)岩-二长(斑)岩类，伴有斑岩型铜、金矿化。

2 岩浆岩时空分布

区内由西到东，以格咱断裂、黑水潭断裂为界，格咱火山-岩浆弧是晚三叠世甘孜-理塘洋壳向西俯冲的产物，为湖盆火山复理石相，沉积了一套巨厚的碎屑岩-碳酸盐岩-火山岩建造，岩性主要为砂板岩

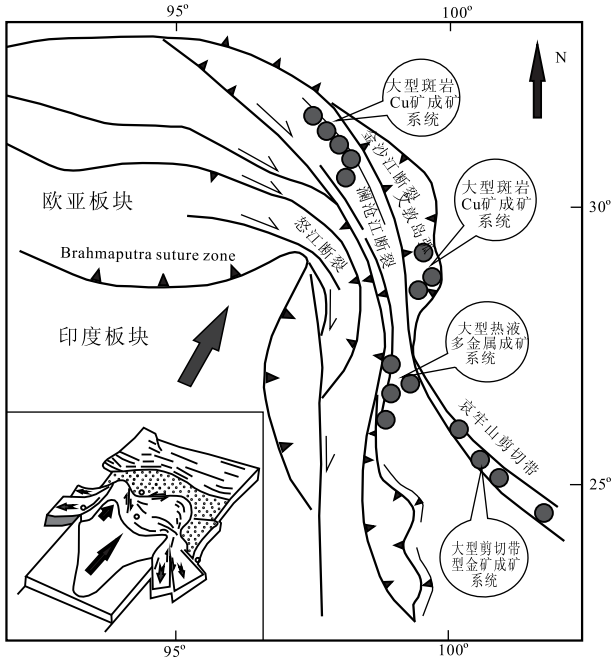


图 1 云南格咱岛弧大地构造位置图

Fig. 1 Setting of Geza island arc zone in Yunnan province

夹灰岩、安山玄武岩-安山岩、英安岩等。火山岩从层位上发育于上三叠统曲嘎寺组和图姆沟组，呈条带状分布，几乎遍布于全区，构成了格咱岛弧火山岩带。本区 NNW 向断裂属早期拉张断裂，控制了印支期中—基性火山岩及同源基性—中基性侵入岩；NW 向及近东西向断裂控制了印支晚期挤压型钙碱性系列钾质中—酸性火山岩，并有大量同源中酸性浅成斑岩及次火山岩分布(图 2)。

从岛弧造山带的发展阶段和侵入岩分布、岩石组合、地球化学特征，格咱岛弧花岗岩带从西到东可划分为：格咱-雪鸡坪岛弧斑岩亚带(西带)、欠虽-普朗岛弧斑岩亚带(中带)、亚杂-卓玛岛弧斑岩亚带(东带)3 个侵入岩带(曾普胜等，2006；李文昌等，2011)。

2.1 格咱-雪鸡坪岛弧斑岩亚带

斑(玢)岩的产出受区域构造的明显控制，靠近乡城-格咱大断裂，岩体数量最多，大小岩体多达 24 个，呈岩株、岩枝和岩墙状产出，总体呈 NNW 向延伸。岩浆侵入活动时间 Rb-Sr 等时线年龄 216 Ma(杨岳清等，2002)、Ar-Ar 坪年龄 249 Ma(曾普胜等，2003)，锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 215.2±1.9 Ma(曹殿华等，2009)，与斑岩型有关的矿产发育。

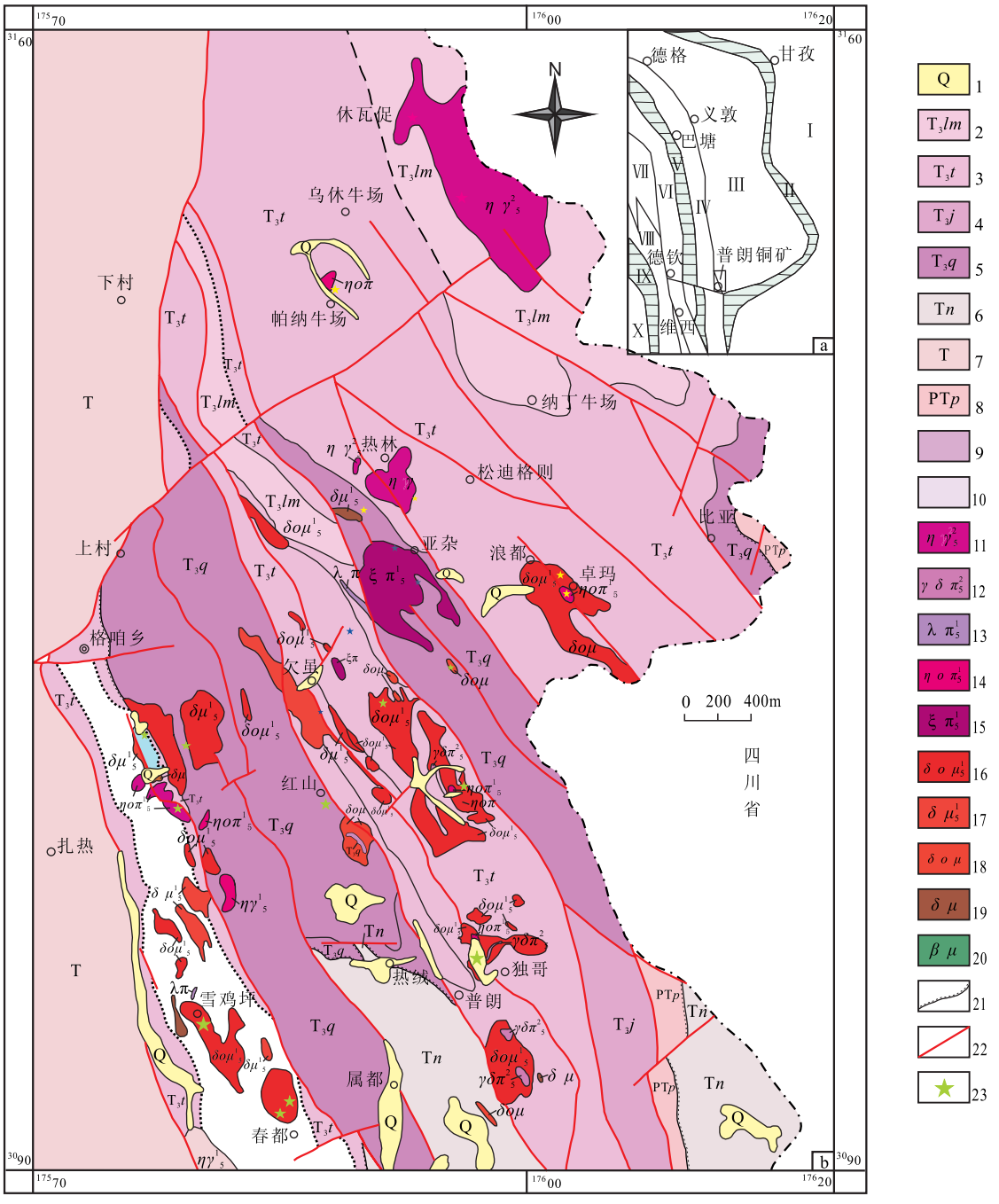


图 2　云南格咱岛弧区域地质简图

Fig. 2　Simplified geological map of Geza island arc in Yunnan Province

1—第四系;2—上三叠统喇嘛垭组;3—上三叠统图姆沟组;4—上三叠统金门过卡组;5—上三叠统曲嘎寺组;6—三叠系尼绕汝组;7—三叠系未分;8—上二叠-下三叠统坪子组;9—安山岩夹火山碎屑岩;10—砂岩夹玄武岩;11—燕山期二长花岗斑岩;12—燕山期花岗闪长斑岩;13—印支期石英斑岩;14—印支期石英二长斑岩;15—印支期英安斑岩;16—印支期石英闪长玢岩;17—印支期闪长玢岩;18—石英闪长玢岩;19—闪长玢岩;20—辉长辉绿岩;21—地质界线;22—断层;23—矿床(点);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

1—Quaternary; 2—Upper Triassic Lamaya Formation; 3—Upper Triassic Tumugou Formation; 4—Upper Triassic Jinmenguoka Formation; 5—Upper Triassic Qugasi Formation; 6—Triassic Niru Formation; 7—undivided Triassic; 8—Upper Permian—Lower Triassic Pingzi Formation; 9—andesite folder pyroclastic rocks; 10—limestone intercalated with basalt; 11—Yanshanian monzonitic granite (granite porphyry); 12—Yanshanian granodiorite porphyries; 13—Indosinian quartz porphyry; 14—Indosinian beschtauite; 15—Indosinian dacite porphyry; 16—Indosinian quartz diorite porphyrite; 17—Indosinian diorite porphyrite; 18—quartz diorite porphyrite; 19—diorite porphyrite; 20—gabbro-diabase; 21—geological boundary; 22—fault; 23—deposit and number; Ⅰ—Yangtze block; Ⅱ—Ganze-Litang suture; Ⅲ—Yidun Island-arc belt; Ⅳ—Zhongza massif; Ⅴ—Jingshajiang suture; Ⅵ—Jiangda-Weixi volcanic; Ⅶ—Changdu-Langping block; Ⅷ—Sandashan-Jinghong volcanic arc; Ⅸ—Langcangjiang suture; Ⅹ—Baoshan block

岩石组合为闪长玢岩-石英闪长玢岩-二长斑岩-石英二长斑岩—花岗斑岩。岩体的岩相分带不明显。岩石具斑状-细粒结构,块状构造。岩石总体蚀变强烈,斑晶较发育,主要为斜长石、角闪石、黑云母及少量石英。斑(玢)岩中氧化物的含量见表 1,SiO_2的含量为 60.93%～71.22%,属于中酸性岩,

表 1 云南格咱岛弧花岗岩主量元素(%)、微量元素和稀土元素含量($\times10^{-6}$)

Table 1 Trace element(%) and REE contents($\times10^{-6}$)of granits in Geza island arc of Yunnan Province

岩带	西带				中带					东带		
样号	GX16	GX18	YS24	YS20	YS22	YS16	YS12	YS7	YS10	GX14	GX13	YS21
岩石名称	闪长岩	闪长玢岩	石英二长斑岩		石英闪长玢岩		石英二长斑岩		花岗闪长斑岩	闪长玢岩	英安斑岩	石英二长斑岩
SiO_2	60.93	65.81	71.22	63.24	63.09	63.48	61.03	68.57	65.01	56.75	63	64.33
TiO_2	0.91	0.7	1.19	0.72	0.65	0.78	0.79	0.59	0.76	0.9	0.38	0.6
Al_2O_3	12.29	9.13	15.99	13.41	14.94	14.75	14.27	13.77	14.8	14.57	14.64	14.2
Fe_2O_3	2.12	4.49	1.07	4.38	2.41	0.84	0.54	1.05	0.19	1.6	0.65	0.42
FeO	2.3	1.14	0.62	0.85	2.73	3.52	3.36	1.95	1.6	4.35	3.12	3.08
MnO	0.09	0.1	0.01	0.15	0.16	0.05	0.08	0.03	0.04	0.12	0.06	0.08
MgO	2.47	4.97	0.55	1.85	2.54	3.96	3.36	2.3	4.13	3.46	2.84	2.31
CaO	5.19	4.94	0.13	2.98	2.4	3.82	3.86	3.11	4.95	5.31	3.52	4.55
Na_2O	0.27	1.69	2.24	1.85	2.81	3.89	2.73	3.41	5.66	4.54	4.17	2.75
K_2O	2.96	1.82	3.64	3.23	3.84	1.69	5.99	3.11	1.03	2.18	3.57	5.5
P_2O_5	0.23	0.06	0.03	0.27	0.4	0.46	0.43	0.42	1.46	0.36	0.35	0.43
总量	100.55	100.08	99.64	99.62	99.26	99.32	99.87	99.41	99.62	99.34	100.4	99.32
σ	0.58	0.54	1.23	1.28	2.2	1.96	2.8	2.07	2.34	3.28	2.87	3.19
SI	24.2	35.2	6.8	15.2	17.7	29.3	14.1	9.9	16.3	21.5	16.2	16.4
DI	58.91	60.84	86.6	70.56	72.63	64.18	70.68	75.61	69.68	61.29	72.19	72.38
Zr	150	96	226	156	179	176	182	206	176	139	170	163
Rb	102	46	132	111	75	82	149	93	114	64	78	125
Sr			117	432	484	813	606	619	686	637	200	688
Ba	1025	497	1648	376	2026	872	2805	543	197	1095	1453	1769
Th	12.7	9.1	19	15	9.3	13	9.7	15	14	16.1	13.6	12
Nb	15.9	8.9	20	15	10	11	11	13	10	9.6	11.8	12
Ta	1.6	0.37	1.54	1.07	0.93	1.78	0.82	0.98	0.74	0.79	1.1	0.97
Hf	5.4	3.2	6.5	4.8	5	5.7	5.2	6.2	5.1	4.2	5.8	5
La	40.58	94.67	45.49	49.91	42.5	37.01	46.54	29.18	6.82	33.87	45.49	34.64
Ce	76.49	141.3	83.74	79.65	74.5	67.17	83.79	54.42	17.15	67.48	83.74	64.93
Pr	8.09	14	9.06	9.12	9.57	8.48	10.7	6.9	2.59	7.61	9.05	8.13
Nd	29.7	46.99	30.83	29.9	34.59	30.89	37.05	25.2	10.3	28.19	30.83	30.1
Sm	4.61	7.91	5.13	5.11	6.04	6.02	6.9	4.87	2.17	5.27	5.13	5.77
Eu	1.11	2.56	1.27	1.36	4.61	1.58	1.75	1.12	1.07	1.36	1.27	1.49
Gd	3.42	5.67	4.02	3.84	4.69	5	5.39	4.02	2.06	4	4.02	4.62
Tb	0.44	0.74	0.53	0.57	0.63	0.67	0.77	0.55	0.3	0.56	0.53	0.64
Dy	2.58	3.42	2.88	2.84	3.41	3.69	3.79	2.97	1.54	2.7	2.88	3.45
Ho	0.51	0.62	0.56	0.55	0.68	0.69	0.72	0.6	0.32	0.49	0.56	0.68
Er	1.27	1.35	1.52	1.41	1.75	1.75	1.78	1.54	0.86	1.28	1.52	1.79
Tm	0.21	0.2	0.25	0.22	0.26	0.26	0.26	0.24	0.13	0.2	0.25	0.27
Yb	1.24	1.08	1.48	1.4	1.74	1.64	1.62	1.47	0.77	1.23	1.48	1.66
Lu	0.19	0.16	0.23	0.23	0.26	0.25	0.24	0.24	0.14	0.19	0.23	0.25
Y	13.5	14	16	13.1	16.92	16.8	17.29	15.13	8.87	13.7	16	17.1
∑REE	184	335	286	199	201.15	181.9	218.6	148.5	55.1	168.11	184.38	176
∑Ce/∑Y	16.3	23.2	7.36	7.25	5.66	4.92	5.86	4.55	2.68	13.5	14.25	4.76
δEu	0.82	1.16	0.96	0.9	1	0.86	0.88	0.83	0.71	0.87	0.79	0.85
(La/Yb)	22.1	59.1	23.9	24	16.5	15.2	19.4	13.4	6	18.55	18.28	14.1
(La/Sm)	5.54	7.53	6.3	6.1	4.4	3.9	4.2	3.8	2	4.04	7.06	3.8

注:国土资源部中南矿产资源监督检测中心,主量元素由 Axios X 射线荧光光谱仪分析,微量元素由 X Series Ⅱ 等离子质谱仪分析。

Al_2O_3的含量为 9.13%～15.99%,全碱(K_2O+Na_2O)含量为 3.23%～5.88%,平均为 4.42%,里特曼指数为 0.58～1.28,属钙碱性岩石系列。岩体的氧化率在 0.39～0.88,平均为 0.51。各类岩石的稀土元素组成见表 1,ΣREE 变化于 184.82×10^{-6}～334.69×10^{-6},ΣCe/ΣY7.25～23.9,平均 13.53,$(La/Yb)_N$22.1～59.07,平均为 32.28,其配分型式为较典型的 LREE 富集型。玢岩和斑岩相比,前者 ΣLREE/ΣHREE 和$(La/Yb)_N$较大,反映斑岩形成时岩浆分异程度较高。斑(玢)岩代表性样品的微量元素与中酸性火山岩和弧型花岗岩非常相似,富集 Ba、La、Hf、Au 和亲铜元素 Cu、Pb,亲铁元素 Mo、Ni,亏损 Rb、Nb、P、Ti。

斑(玢)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。上述斑玢岩与弧花岗岩的岩石系列相同(钙碱性),成因类型一致(I 型花岗岩),在 SiO_2含量相同值下,斑(玢)岩的 CaO、MgO、Al_2O_3等含量相对偏低。

2.2　欠虽-普朗岛弧斑岩亚带

在格咱岛弧中分布较为广泛,斑(玢)岩体沿格咱岛弧的复背斜及次级背斜轴部发育,斑(玢)岩的产出受构造控制明显,岩体数量大小多达 46 个,呈岩株、岩枝和岩墙状产出,总体呈 NNW 向展布和延伸。发育于图姆沟组中的岩体,侵入深度较浅,地表露头较大,斑岩型矿化发育,以普朗复式岩体为代表。在以滨海-陆相建造沉积物为主的喇嘛垭组中基本不出露,反映了侵入岩和火山岩之间的内在联系,围岩普遍具角岩化和绢英岩化。岩浆活动时限为 Rb-Sr 等时年龄 254～223 Ma(云南省地质矿产局,1990)、Ar-Ar 坪年龄 216.3Ma,等时线年龄 220Ma(曾普胜等,2006)、石英二长斑岩辉钼矿 Re-Os 测年和矿化斑岩体 K-Ar 测年为 221～235Ma(李文昌等,2007b),总体比西带要新。

岩石组合为闪长玢岩-石英闪长玢岩-二长斑岩-石英二长斑岩-花岗斑岩。岩体的岩相分带不明显。斑(玢)岩中氧化物的含量见表 1,SiO_2的含量为 61.03%～68.57%,属于中酸性岩,Al_2O_3的含量为 13.77%～14.94%,全碱(K_2O+Na_2O)含量为 5.58%～8.72%,平均为 6.83%,里特曼指数为 1.96～2.8,基本多在 3 以下,属钙碱性岩石系列。岩体的氧化率(*OX*)为 0.16～0.56,平均为 0.33,反映了岩体的侵位深度比西带深。各类岩石的稀土元素组成见表 1,与区域中基性火山岩差别较大,但与中酸性火山岩的组成比较相似,ΣREE 变化于 55.1×10^{-6}～218.6×10^{-6},ΣCe/ΣY 2.68～5.86,平均 3.96,$(La/Yb)_N$为 6～19.4,平均 9.87,都较西带小,分异程度较小。其配分型式为较典型的 LREE 富集型,δEu 为 0.71～1.0,表现为无明显的 Eu 异常。而玢岩和斑岩相比,前者 ΣCe/ΣY 和$(La/Yb)_N$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,富集 Ba、La、Hf、Au 和亲铜元素 Cu、Pb,亲铁元素 Mo、Ni,亏损 Rb、Nb、P、Ti。斑(玢)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。

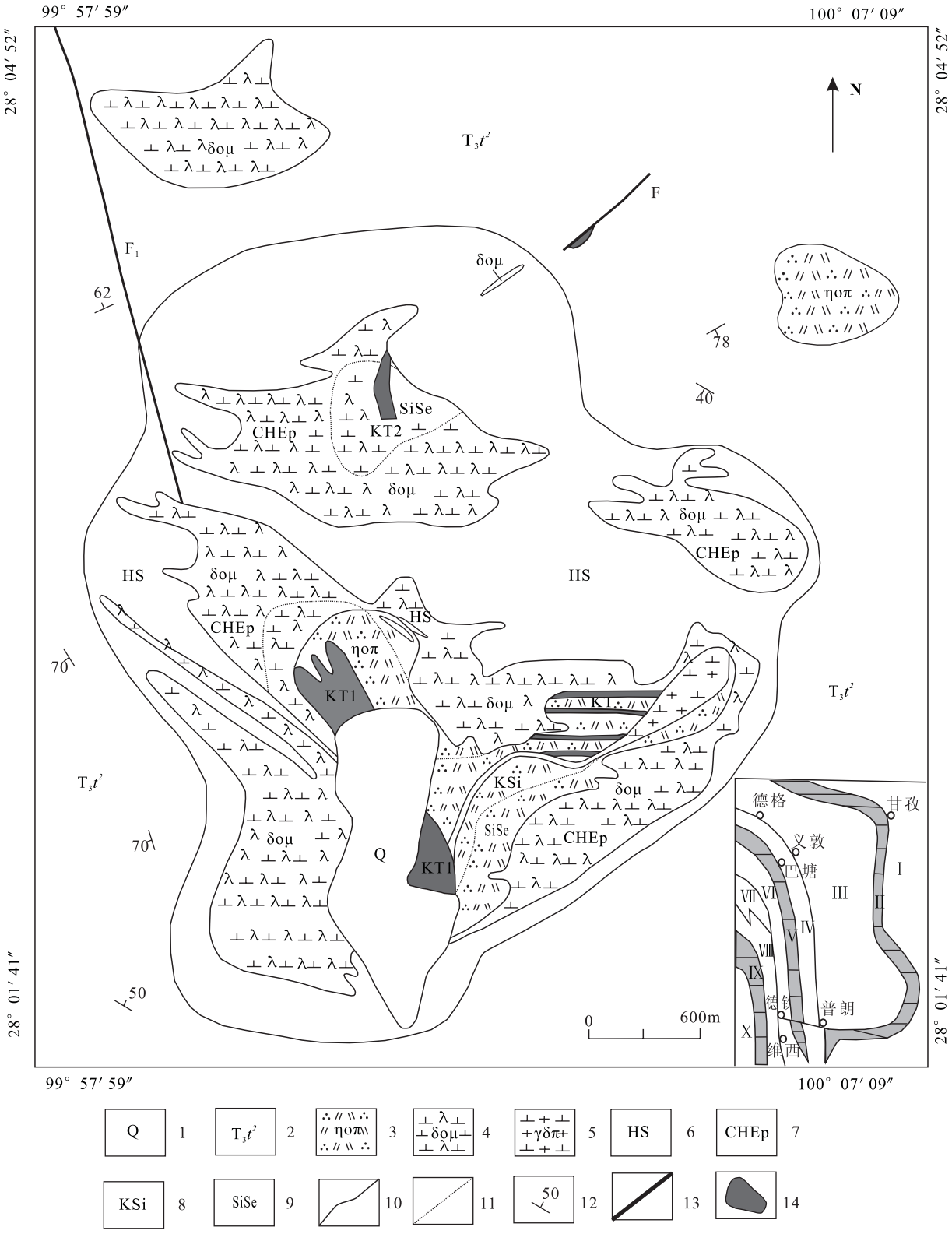
2.3　亚杂-卓玛岛弧斑岩亚带

位于弥里躺断裂以东地带,斑(玢)岩数量最少,呈岩株、岩枝和岩墙状产出,岩体轴向 NNW。侵入于曲嘎寺组基性火山岩中的玢岩,一般地表露头较小,呈岩枝和岩墙状产出,但侵入深度较大,常向下呈隐伏岩株。岩浆活动时限,仅根据迪隆英安斑岩体侵位于晚三叠世图姆沟组中,角闪石 Ar-Ar 年龄 53.02Ma(莫宣学等,1993),考虑到该侵入体普遍经受了浅变质作用,故该年龄值可能代表了亚杂蚀变英安斑岩体遭受了区域构造-热事件改造的年龄。因此,该岩体形成时代应早于 53Ma,总体比东带新。

岩石的 SiO_2的含量为 56.75%～64.33%,碱金属的含量较前述其他斑(玢)岩则有所减少。里特曼指数(δ)在 2.87～3.19。岩体的氧化率(*OX*)0.14～0.64,平均为 0.32,大于中带和西带,代表了岩体的侵位深度深。岩石的稀土元素组成见表 1,与区域中酸性火山岩的组成比较相似,∑REE 变化于 168.11×10^{-6}～184.38×10^{-6},∑Ce/∑Y 变化于 4.76～14.25,平均为 10.08;$(La/Yb)_N$平均为 16.98,其配分型式为典型的 LREE 富集型。

3　普朗复式斑岩体矿床地质特征

普朗复式斑岩体位于普朗-红山铜多金属成矿亚带,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,自上而下可分为曲嘎寺组(T_3q)、图姆沟组(T_3t)和喇嘛垭组(T_3lm)。普朗复式岩体主要侵入于图姆沟组的砂板岩和安山岩中,岩体呈不规则产出,呈 NW 向展布,地表出露面积约为 $12km^2$(图 3),侵入岩为与安山岩同源的印支期中酸性浅成斑岩,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



Q 1 T_3t^2 2 ηοπ 3 δομ 4 +γδπ+ 5 HS 6 CHEp 7

KSi 8 SiSe 9 10 11 50 12 13 14

图 3 云南省普朗斑岩型铜矿地质图(据云南省地质调查局修改[1])

Fig. 3 Geological sketch map of the Pulang porphyry copper deposit in Yunnan Province (revised after Yunnan geological survey[1])

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

1—Quaternary; 2—Upper Triassic Tumugou Formation; 3—Indosinian quartz monzonite porphyry; 4—Indosinian quartz diorite porphyrite; 5—Indosinian granodiorite-porphyry; 6—hornstonefelspthazition belt; 7—propylitization belt; 8—potassic-alteration belt; 9—sericite-lithification belt; 10—geological boundary; 11—alteration boundary; 12—ascertain occurrence; 13—fault; 14—orebody

面上为一不规则的卵形,剖面上呈一向上凸起的穹窿。赋矿岩石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 17.00～700.30m,铜品位为 0.20%～3.74%,平均为 0.44%,品位变化系数为 68.69%。

3.1　侵入岩体的岩石学特征

石英闪长玢岩,岩石呈灰色、灰黑色,具细粒结构、显微粒状结构、半自形粒状结构等,块状构造。主要矿物由斜长石(15%～50%)、角闪石(3%～20%)、石英(5%～10%)、钾长石(0%～5%)、少量黑云母(1.1%),岩石具绢英岩化或青磐岩化。

石英二长斑岩,岩石呈灰色,具半自形粒状结构,块状构造。主要矿物由斜长石(10%～25%)、钾长石(14%～40%)、石英(5%～15%)、角闪石(1%～20%)、黑云母(5.2%)等组成。岩石蚀变以绢英岩化或硅化钾化为主,局部有绿泥石化、黑云母化。

花岗闪长斑岩,岩石呈灰色,具半自形粒状结构,块状构造。主要矿物有钾长石(20%)、斜长石(30%)、石英(15%～20%)、黑云母(2%～3%)。岩石蚀变以绢英岩化或硅化钾化为主。

3.2　含矿岩体的地球化学特征

普朗复式岩体含矿斑岩的氧化物含量如表 2 所示。SiO_2 含量为 60.96%～65.78%,属于中酸性岩。Al_2O_3 含量为 14.80%～15.97%,变化不大,(K_2O+Na_2O)为 5.79%～10.99%,平均 8.15%,较中酸性岩含量较高,K_2O/Na_2O 为 0.70～1.14,里特曼指数(σ)为 1.02～1.9,岩石属于钙碱性系列。固结指数(SI)为 7.65～24.77,分异指数(DI)为 61.17～70.58,也指示岩浆分异较好。A/CNK 为 0.74～0.981,岩石为准铝质花岗岩,在 TAS 图解(图 4)中,多数样品投影点落入安山岩-英安岩岩区,具岩浆岩成矿专属性特征。

区内与成矿关系密切的岩石类型为石英闪长玢岩、石英二长斑岩以及花岗闪长斑岩。普朗含矿岩体具有较高的稀土元素总量(表 3),ΣREE 变化于 131.6×10^{-6}～217×10^{-6},LREE/HREE 平均为 7.32,$(La/Yb)_N$=7.82～14.74,平均为 13.38,表明轻重稀土分馏明显;$(La/Sm)_N$=1.72～18.1,平均为 3.62,显示轻稀土分馏较强;$(Gd/Yb)_N$=1.44～3.14,平均为 2.07,表明重稀土分馏轻微,其分配形式呈现典型的 HREE 富集型。在稀土配分曲线图上表现为向右中等倾斜的平滑曲线,且曲线左部分(轻稀土)较陡,而右部分(重稀土)相对平缓。δEu=0.58～1.14,平均 0.97,δEu 表现为弱或无明显异常。斑岩与玢岩相比,其 LREE/HREE 和 $(La/Yb)_N$ 值相对较高的结果,反映了斑岩形成是岩浆分异程度相对较高。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 5)上基本一致,显示为同源岩浆不同阶段演化的产物。

表 2　云南省普朗复式斑岩体含矿岩体主元素组成(%)

Table 2　Major element content of Pulang mineralized porphyry in Yunnan Province (%)

样号	PL-060	PL-061	PL-062	PL-063	PL-028	PL-034	PL-035	PL-037	PL-048	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	65.78	65.15	64.95	64.1	64.17	62.82	64.31	60.96	62.07	65.01
TiO_2	0.5	0.46	0.5	0.5	0.53	0.79	0.81	0.74	0.76	0.76
Al_2O_3	15.52	15.97	15.63	15.48	15.59	14.75	15.59	14.63	14.57	14.8
Fe_2O_3	5.23	4.77	5.03	4.95	5.61	4.47	3.43	6.35	6.74	0.19
MnO	4.05	3.9	4.15	3.85	3.95	1.9	2.2	4.5	5.9	1.6
MgO	0.056	0.057	0.046	0.041	0.08	0.059	0.043	0.076	0.051	0.04
CaO	1.73	1.29	1.9	1.99	1.84	4	3.45	3.61	3.76	4.13
Na_2O	3.61	3.59	3.29	3.04	3.82	5.78	4.67	4.92	3.01	4.95
K_2O	4.02	3.83	3.57	3.18	4.02	5.21	5.08	3.42	2.78	5.66
P_2O_5	3.13	3.19	4.59	5.11	3.15	0.78	1.25	4.32	5.69	1.03
灼减量	0.19	0.2	0.24	0.23	0.2	0.44	0.42	0.41	0.4	1.46
总量	103.94	103.83	104.06	103.77	103.86	101.83	102.12	104.41	105.81	99.62
σ	1.24	1.22	1.64	1.74	1.3	0.95	1.02	1.65	1.9	2.34
SI	9.6	7.65	9.93	10.49	10	24.77	22.57	16.39	15.19	16.3
DI	68.31	68.74	70.08	70.58	66.88	61.31	65.19	61.17	64.01	69.68
A/CNK	0.937	0.981	0.929	0.95	0.919	0.74	0.857	0.76	0.899	0.68

注:样品由核工业地质研究院分析测试中心测试,采用 X-荧光光谱仪(XRF)测定,精度优于 5%。

表 3 云南省普朗复式岩体稀土和微量元素分析结果($\times10^{-6}$)

Table 3 REE and trace element analysis of Pulang composite pluton in Yunnan Province($\times10^{-6}$)

样号	岩石名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE
PL-060	石英闪长玢岩	48	86.6	9.7	35.7	6.6	2.1	5.9	0.8	4.5	0.9	2.7	0.4	2.2	0.3	23.9	206.35
PL-061		32.9	72.5	9.3	40.7	9.2	3	7.6	1	5.1	0.9	2.4	0.3	2	0.3	23.2	187.07
PL-062		36.4	72	9.2	39.5	8.4	2.9	7.4	0.9	4.6	0.9	2.3	0.3	1.9	0.3	23	186.94
PL-063		40.8	85.8	11	44.6	9.1	2.5	6.5	0.9	4.3	0.7	2.1	0.3	1.9	0.3	22.5	210.86
PLB-004		22	58.1	8.2	35.2	8.1	2.4	5.5	0.8	4.5	0.9	2.4	0.3	1.9	0.3	21.8	150.54
PL-015	矿化石英二长斑岩	42.5	75	8.8	33.3	6.1	2.3	6.3	0.9	4.7	0.8	2.1	0.3	1.8	0.3	21	185.11
PL-028		38.6	70.3	7.7	26.4	5.4	1.3	6.1	0.9	4.9	1.1	3.3	0.5	3	0.5	33.6	169.94
PL-034		38.6	77.6	9.4	35.5	6.6	1.5	5.8	0.8	4.1	0.8	2.2	0.3	2	0.3	23.1	185.52
PL-035		42.8	79.6	9.5	34.2	6.9	1.3	6.5	1.1	6.1	1.3	3.8	0.5	3.2	0.5	37	197.31
PL-037		29.1	55.4	6.8	26.4	4.7	1.4	4	0.5	2.8	0.5	1.5	0.2	1.4	0.2	14.4	134.93
PL-048		31.3	58.7	6.9	27.9	5	1.4	4	0.5	2.8	0.5	1.5	0.2	1.4	0.2	13.2	142.3
PL-051		44.4	75.3	8.9	36.1	7.4	2.7	6.8	0.7	3.5	0.7	2.1	0.3	1.8	0.2	19	191
PL-052		50.9	88.9	11	39.6	7.8	2.5	6	0.8	4.1	0.8	2.1	0.3	1.9	0.3	20.5	216.43
PLN1-2	花岗闪长斑岩	15.4	32.1	4.8	21	5.4	1.8	5.4	1	5.6	1.1	2.8	0.5	2.7	0.3	26.3	99.72
PL3-5		22.1	42.1	4.7	17.9	3.6	1.5	3.6	0.5	2.9	0.6	2.1	0.3	2.2	0.4	18.7	104.6
PL6-1		18	34.4	4.9	23	6.4	2.1	5.5	1	6.1	1.2	3.7	0.5	3	0.4	33.1	110.12
PL9-1		18.1	39.7	5.9	28.8	8.1	2.2	6.9	1.3	8.5	1.6	4.9	0.7	4.2	0.6	41.9	131.55
PL10-2		14.4	30.2	4.5	19.6	5.5	1.8	6.2	1.1	6.6	1.3	3.8	0.5	3.4	0.4	36.9	99.25

样号	岩石名称	Li	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Ba	Hf	Ta	Pb	Bi	Th	Ni	V
PL-060	石英闪长玢岩	22	254	305	18	133	412	357	15.5	5	2172	7.3	1.1	134	5.4	14	47	174
PL-061		49	243	79	16	111	1098	355	16.6	1.6	2219	7.9	1.1	19	1.1	9.6	56	226
PL-062		29	244	63	14	101	990	291	18.4	1.4	2514	7	1.2	15	1.4	10	45	207
PL-063		7.5	71.5	49	15	6.6	1070	74	12.6	0.7	171	2.4	0.9	9	0.6	11	12	150
PLB-004		14	59.4	33	14	8.3	1107	89	12.9	0.5	190	2.9	1	12	0.6	18	12	143
PL-015		11	2107	63	13	188	569	216	9.84	4.9	2634	5.2	0.8	22	15	13	46	123
PL-028	矿化石英二长斑岩	8.4	68.6	67	18	139	854	318	12.3	1.6	2261	7.3	0.8	9.9	0.2	13	25	173
PL-034		25	127	58	20	294	146	307	17.9	1.3	1273	6.3	1.5	116	0.6	16	8.4	159
PL-035		17	330	191	21	83	761	419	17.3	5.8	498	8	1.1	51	1.7	17	37	197
PL-037		25	288	103	23	234	525	303	18.5	0.9	782	6.7	1.3	58	1.6	17	42	184
PL-048		16	1702	74	13	118	761	188	10.8	20	1097	4.7	0.8	30	2.1	12	9	76
PL-051		13	1412	56	12	117	722	178	10.6	50	1219	5	0.8	28	1.8	12	9.5	78
PL-052		4.8	4156	97	12	115	963	236	11.2	16	2428	5.7	0.8	27	5.3	15	20	146
PLN1-2		5.3	2820	90	14	99	941	230	11.6	9.5	2187	5.8	0.8	22	3.8	15	19	156
PL3-5	花岗闪长斑岩	12	82.8	131		2	241	146	20.7		77.8	3.6	1.2	11	0	1.6	118	319
PL6-1		32	828	44	19	234	106	300	17.1	0.8	2160	6.7	1.4	345	1	14	4.6	160
PL9-1		18	95.8	115	13	2.2	235	132	18.2	0.3	120	4	1.1	2.9	0.2	2.5	117	290
PL10-2		28	163	102	17	1.3	288	272	19.6	0.4	52.4	6.7	1.2	3.2	0.2	1.9	83	443
PL-060		20	68.3	125	17	1.8	545	191	14.6	0.5	60.9	5	0.9	9.6	0.2	1.3	69	448

注：样品由核工业地质研究院分析测试中心测试，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%。

普朗复式岩体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 的含量较高；安山岩和泥质板岩中元素的含量普遍较低。玢岩和斑岩相比，前者 $\Sigma Ce/\Sigma Y$ 和 $(La/Yb)_N$ 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(王守旭等，2007；李文昌等，2007b；尹光侯等，2009)，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❷。

4 同位素年代学

4.1 样品的采集与分析

本次研究的样品全部采自普朗铜矿区含矿斑岩

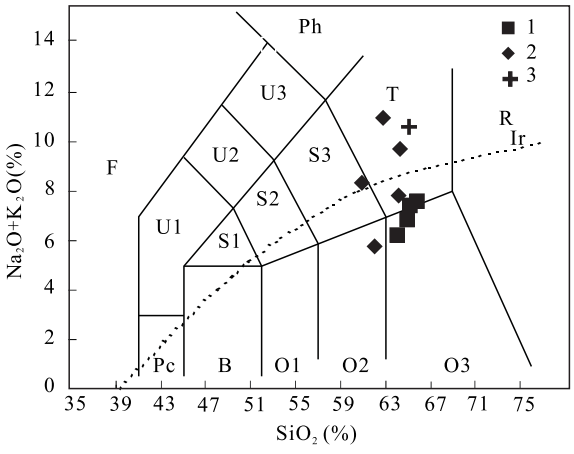


图 4　云南省普朗复式斑岩体 TAS 分类图
(底图据 Le Bas et al.,1986)

Fig. 4　TAS diagram showing data from Pulang composite pluton in Yunnan Province(after by Le Bas et al.,1986)

1—石英闪长玢岩;2—石英二长斑岩;3—花岗闪长斑岩; Pc—苦橄玄武岩;B—玄武岩;O1—玄武安山岩;O2—安山岩;O3—英安岩;R—流纹岩;S1—粗面玄武岩;S2—玄武质粗面安山岩;S3—粗面安山岩;T—粗面岩、粗面英安岩;F—副长石岩;U1—碱玄岩、碧玄岩;U2—响岩质碱玄岩;U3—碱玄质响岩;Ph—响岩;Ir—Irvine 分界线

1—Quartz diorite porphyrite;2—quartz monzonite porphyry;3—granodiorite-porphyry; Pc—picro-basalt; B—basalt; O1—basaltic-andesite; O2—abdesite; O3—dacite; R—rhyolite; S1—trachybasalt; S2—basaltic trachyandesite; S3—trachyandesite; T—trachyte, rough dacite; F—foidite; U1—tephrite (basalte); U2—phonotephrite; U3—tephriphonolite; Ph—phnonlite; Ir—irvine line

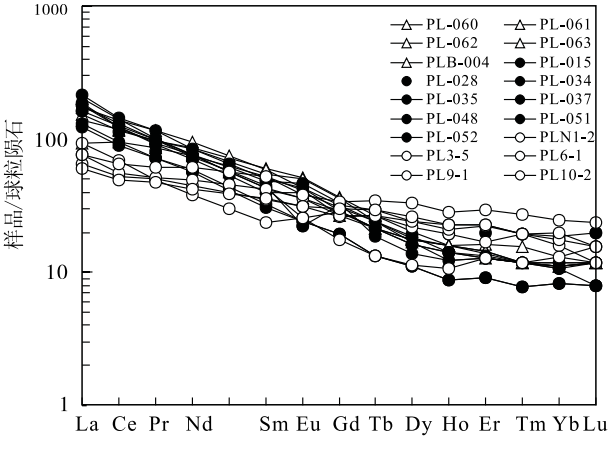


图 5　云南省普朗复式斑岩体稀土元素配分型式

Fig. 5　REE patterns of Pulang composite pluton in Yunnan Province

体的地表露头及见矿钻孔岩芯,岩性主要为石英闪长玢岩和石英二长斑岩。首先对野外采集的石英闪长玢岩、石英二长斑岩样品粉碎,进行锆石单矿物的挑选。锆石制靶由中国地质科学院北京离子探针中心制备,其直径为 25mm,厚 5mm。锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,ICP-MS 为 Agilent 7500a。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCa 完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法见(Liu Y et al.,2010)。

4.2　同位素分析结果

样品 PL-09,岩性为石英闪长玢岩,分析结果见表 4。20 个测点的分析结果表明,锆石中 Th、U 含量较高,其中 Th 的含量为 $161.7\times10^{-6}\sim942.5\times10^{-6}$,U 的含量为 $269.2\times10^{-6}\sim774.97\times10^{-6}$,Th/U 比为 0.82～1.61,表明锆石属于典型的岩浆成因的锆石。年龄值的变化范围为 214.2～229.1 Ma,年龄值分布在$^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ 谐和线及其附近(图 6a),其加权平均年龄为 220.8±4.1Ma,代表了含矿石英闪长玢岩岩浆结晶的年龄。PL-042,岩性为石英二长斑岩,分析结果见表 4。25 个测点的分析结果表明,锆石中 Th 的含量达 $270.95\times10^{-6}\sim1694.41\times10^{-6}$,U 的含量为 $331.38\times10^{-6}\sim958.66\times10^{-6}$,Th/U 比为 0.75～1.39,具岩浆成因锆石的特征。年龄值的变化范围为 210.45～229.36Ma,年龄值分布在$^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ 谐和线及其附近(图 6b),其加权平均年龄为 214.8±3.5Ma,代表了含矿石英二长斑岩的岩浆结晶年龄。

另据以往的研究成果表明,花岗闪长斑岩有效的坪谱年龄为 209.4±1.7 Ma,其对应的等时线年龄为 204.1±9.2Ma 与坪谱年龄较为近似(李文昌等,2009),由此可以判定普朗复式岩体花岗闪长斑岩的形成时代明显晚于石英二长斑岩和石英闪长玢岩。从早到晚,从石英闪长玢岩到石英二长斑岩再到花岗闪长斑岩,其年龄从 220.8Ma 到 214.8Ma 再到 204Ma,与宏观地质现象相吻合,且三者同位素年龄相差 5～10 Ma,与复式岩体涌动侵入的时间间隔基本相当,说明普朗岩体为多次涌动侵入形成的复式岩体。

对于普朗复式岩体同位素年龄的研究,前人已做了大量的研究。其中石英二长斑岩中二组黑云母 Ar-Ar 年龄分别为 214.58±0.91 Ma、216.0±1 Ma

表 4 云南省普朗斑岩体锆石 LA-ICP-MS 分析数据

Table 4 LA-ICP-MS zircon analytical data for the Pulang porphyries of Yunnan Province

点位	Th ($\times10^{-6}$)	U ($\times10^{-6}$)	Th/U	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄（Ma）	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$ 年龄（Ma）	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄（Ma）	1σ
PLB-09 石英闪长玢岩													
PLB09-01	282.46	284.22	1.01	0.2598	0.01024	0.03437	0.00039	427.8	94.4	234.5	8.3	217.9	2.5
PLB09-02	398.51	415.91	1.04	0.2383	0.00915	0.03382	0.00037	239.0	88.9	217.0	7.5	214.4	2.3
PLB09-03	340.93	455.26	1.34	0.2425	0.00824	0.03400	0.00035	333.4	79.6	220.5	6.7	215.5	2.2
PLB09-04	288.93	336.93	1.17	0.2324	0.00956	0.03453	0.00038	164.9	103.7	212.1	7.9	218.8	2.4
PLB09-05	942.54	774.97	0.82	0.2368	0.00760	0.03378	0.00045	242.7	75.9	215.8	6.2	214.2	2.8
PLB09-06	574.16	513.73	0.89	0.2432	0.01345	0.03566	0.00062	172.3	129.6	221.0	11.0	225.9	3.9
PLB09-07	884.78	724.08	0.82	0.2215	0.01740	0.03325	0.00081	109.4	177.8	203.2	14.5	210.8	5.1
PLB09-08	580.10	488.70	0.84	0.2640	0.02819	0.03493	0.00115	413.0	246.3	237.9	22.7	221.3	7.2
PLB09-09	326.12	397.18	1.22	0.2451	0.03337	0.03393	0.00143	301.9	288.9	222.6	27.2	215.1	8.9
PLB09-10	167.10	269.20	1.61	0.2316	0.03823	0.03442	0.00177	164.9	351.8	211.5	31.5	218.2	11.0
PLB09-11	355.77	418.23	1.18	0.2474	0.00901	0.03448	0.00039	300.1	82.4	224.5	7.3	218.5	2.4
PLB09-12	341.48	413.70	1.21	0.2398	0.00988	0.03618	0.00107	142.7	98.1	218.3	8.1	229.1	6.7
PLB09-13	291.98	316.62	1.08	0.2595	0.01277	0.03547	0.00059	388.9	121.3	234.3	10.3	224.7	3.7
PLB09-14	200.23	287.85	1.44	0.2432	0.01068	0.03491	0.00043	220.4	99.1	221.0	8.7	221.2	2.7
PLB09-15	386.48	407.59	1.05	0.2570	0.01068	0.03502	0.00048	331.5	90.7	232.2	8.6	221.9	3.0
PLB09-17	666.14	561.39	0.84	0.2400	0.00850	0.03398	0.00038	239.0	75.0	218.4	7.0	215.4	2.4
PLB09-18	466.68	459.37	0.98	0.2363	0.00902	0.03420	0.00038	198.2	90.7	215.4	7.4	216.8	2.4
PLB09-20	373.45	431.67	1.16	0.2526	0.00970	0.03528	0.00039	264.9	80.5	228.7	7.9	223.5	2.5
PL-042 石英二长斑岩													
PL042-01	238.78	331.38	1.39	0.2340	0.0114	0.0344	0.0005	190.82	112.02	213.46	9.35	218.09	2.95
PL042-02	431.41	415.57	0.96	0.2238	0.0097	0.0351	0.0004	13.06	109.25	205.10	8.04	222.48	2.26
PL042-04	520.66	435.63	0.84	0.2414	0.0127	0.0335	0.0003	301.91	120.35	219.53	10.36	212.25	2.14
PL042-06	470.52	473.72	1.01	0.2269	0.0126	0.0342	0.0003	98.24	129.61	207.67	10.45	216.63	2.04
PL042-07	324.01	304.11	0.94	0.2457	0.0136	0.0333	0.0004	346.35	124.06	223.10	11.06	211.39	2.42
PL042-08	283.86	333.82	1.18	0.2399	0.0112	0.0335	0.0004	287.10	107.39	218.34	9.21	212.52	2.60
PL042-09	635.48	548.29	0.86	0.2522	0.0093	0.0361	0.0004	220.44	87.02	228.37	7.50	228.78	2.26
PL042-10	877.36	661.39	0.75	0.2592	0.0315	0.0331	0.0003	453.75	248.11	234.05	25.42	210.02	2.06
PL042-11	1694.41	958.66	0.57	0.2345	0.0067	0.0332	0.0003	250.07	63.88	213.92	5.48	210.56	1.69
PL042-12	463.41	447.28	0.97	0.2458	0.0100	0.0332	0.0004	364.87	62.03	223.20	8.15	210.45	2.19
PL042-13	685.63	572.12	0.83	0.2397	0.0077	0.0338	0.0003	264.88	77.77	218.19	6.33	214.11	1.89
PL042-14	398.41	413.63	1.04	0.2521	0.0100	0.0342	0.0004	346.35	90.73	228.24	8.07	217.07	2.27
PL042-15	270.95	332.91	1.23	0.2651	0.0112	0.0346	0.0004	438.94	96.29	238.74	9.01	219.28	2.56
PL042-16	760.29	603.84	0.79	0.2552	0.0084	0.0340	0.0003	388.94	74.07	230.76	6.80	215.55	2.16
PL042-17	440.58	437.30	0.99	0.2435	0.0095	0.0350	0.0004	209.33	90.73	221.25	7.74	221.88	2.37
PL042-18	311.05	320.88	1.03	0.2952	0.0144	0.0362	0.0005	612.98	112.95	262.67	11.27	229.36	2.83
PL042-19	355.10	421.12	1.19	0.2462	0.0092	0.0337	0.0004	331.54	88.88	223.46	7.53	213.83	2.23
PL042-20	437.33	413.24	0.94	0.2510	0.0091	0.0342	0.0004	344.50	85.18	227.36	7.40	216.63	2.40
PL042-21	660.66	493.31	0.75	0.2503	0.0088	0.0343	0.0004	331.54	80.55	226.81	7.16	217.48	2.37
PL042-23	310.25	351.34	1.13	0.2614	0.0099	0.0338	0.0004	461.16	87.03	235.81	8.01	214.17	2.44
PL042-24	528.80	500.03	0.95	0.2405	0.0082	0.0339	0.0004	253.77	79.62	218.82	6.70	214.69	2.24
PL042-25	318.16	347.98	1.09	0.2466	0.0119	0.0340	0.0004	320.43	113.88	223.81	9.66	215.26	2.19

（曾普胜等，2006），4 组黑云母 K-Ar 同位素年龄（曾普胜等，2006；李文昌等，2007a）分别为 221.5±2.0 Ma、230.9±2.2 Ma、223.5±2.1 Ma、235.4±2.1 Ma，但受 K-Ar 和 Ar-Ar 同位素封闭温度的影响，这些年龄值普遍较大。普朗复式岩体辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄（李文昌等，2007b）为 213±3.8 Ma，与本次工作所获得的锆石 U-Pb 同位素年龄基本一致。从区域上看，与普朗复式岩体位于同一构造岩浆岩带内的红山岩体、浪都岩体、懒中岩体、雪鸡坪岩体、春都岩体、帕纳牛场斑岩体相比较，除个别年龄数据明显偏大外，其余年龄值与普朗复式岩体的同位素年龄数据大致相当。由此可见，无论是侵入岩体，还是金属矿床（点），各种方法定年结果一致表明成岩、成矿作用都形成于三叠纪甘孜-理塘洋盆的

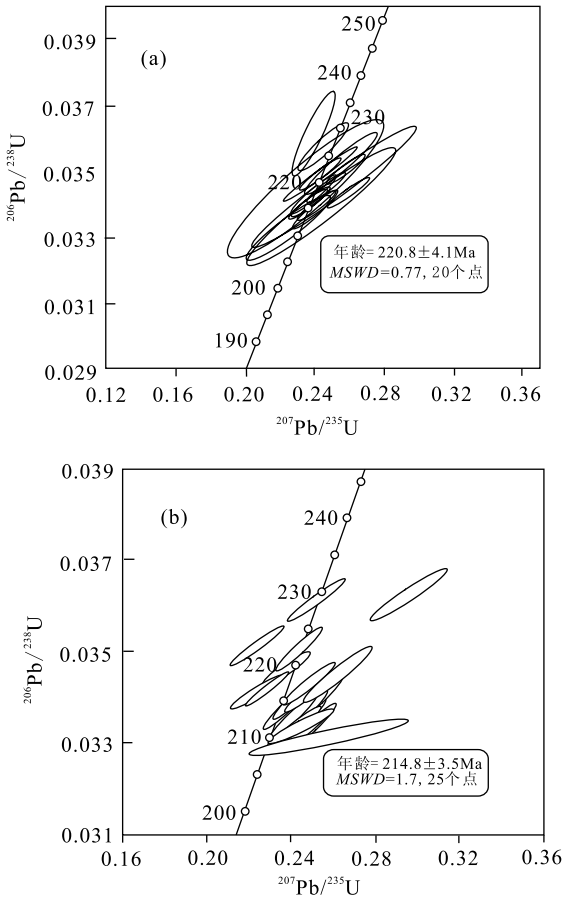


图 6　云南省普朗斑岩铜矿含矿斑岩体锆石 $^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ 谐和图

Fig. 6　Zircon $^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ concordia diagram of ore-bearing porphyries from Pulang porphyry deposit in Yunnan Province

俯冲过程中,属印支期岩浆作用的结果。从格咱岛弧带活动时限 250～203Ma 分析,两个斑岩带的活动时限与甘孜-理塘洋壳的俯冲时限 238～206Ma 相近。

5　讨论

义敦岛弧主体形成于晚三叠世卡尼期末期,发育在一个长期处于伸展状态下的薄陆壳之上,基底由古老变质结晶基底和震旦系—中下三叠统沉积盖层构成。晚三叠世卡尼期晚期,甘孜-理塘洋盆形成,洋壳沿甘孜-塘理海沟向西俯冲是导致义敦岛弧形成发育的根本原因,并在北部发育昌台岛弧,中部发育乡城岛弧,南端发育格咱岛弧(侯增谦等,1991,2004;李文昌等,2001)。格咱岛弧位于义敦岛弧的最南端,以岛弧火山岩的大量发育和浅成—超浅成中酸性斑(玢)体的侵入为主要标志,不发育弧后扩张盆地,显示了压性弧的特征。

格咱岛弧的火山岩主要发育在上三叠统曲嘎寺组和图姆沟组中,以安山岩为主,有少量玄武岩和英安岩、流纹岩,岩石富钾、LREE 和大离子不相容元素高度富集,主要为钙碱性岩石系列,晚期有少量碱性系列岩石发育。包括普朗复式岩体在内的大量中酸性斑(玢)体侵位于格咱岛弧的火山岩系中,这些岩体空间上与曲嘎寺组和图姆沟组的岛弧安山质火山岩密切伴生,侵位时间也基本一致或稍晚于火山岩,岩石地球化学特征基本一致,岩石系列以钙碱性系列为主,晚期有少量碱性系列岩石发育,强烈富集大离子不相容元素、亏损高场强元素等,表明二者具有基本相同或相近的源岩和岩浆演化过程。

甘孜-理塘洋壳向西俯冲,源自俯冲板片的脱水流体对地幔源区的交代作用,诱发幔源岩浆熔融,形成低密度和低粘度初熔带,底辟上升和岩浆分异作用形成钙碱性岩浆,而后岩浆结晶分异上涌或侵位形成钙碱性岛弧火山岩浅成—超浅成中酸性斑(玢)岩系,即岛弧岩浆岩。由于格咱岛弧为压性弧,在挤压型的应力场中,原生岛弧钙碱性岩浆的低密度特征决定了该岩浆发生多阶段分离结晶作用。在上地幔区,因其密度小于地幔密度而向上运移,在壳-幔界面,被地壳低密度坝截留而发生分离结晶作用,派生的岩浆因其密度小于地壳密度而向上运移并喷出或侵位,形成中性—中基性的火山岩或斑(玢)岩。

格咱岛弧带中与斑(玢)岩有关的斑岩型及矽卡岩型矿床的形成,要求有一个相对压性的环境和相对发育的盖层系统,以防止成矿流体在沸腾时大量散失。岩体侵位后,断裂仍处于活动期,来自上地幔和下地壳的岩浆热液汇聚、运移并扩散,交代蚀变断裂两侧的岩石,形成了不同矿物组合的蚀变分带。由于岩浆的浅成侵位导致物化条件的改变,富含 Cu、Fe 等成矿元素及 H_2O、HCl、S、Cl、O、CO_2 的碱金属配合物和重金属配合物开始分解,并发生成矿金属元素的沉淀富集。当流体集聚于浅成侵入岩体的顶部,流体聚集导致流体压力不断增大,当超过负荷压力时,便发生隐爆作用,引起成矿流体的沸腾和爆破,产生网脉状破裂系统和爆破角砾岩筒,并形成高品位的铜多金属矿化。

6　结论

(1)格咱岛弧花岗岩受构造控制明显,呈 NNW 向展布,印支晚期岛弧花岗岩带总体从西到东可分为格咱-雪鸡坪(西带)、欠虽-普朗(中带)、亚杂-卓玛

(东带)3 个岩带,属Ⅰ型花岗岩。

(2)格咱岛弧侵入岩从石英闪长玢岩→石英二长斑岩、英安斑岩→花岗闪长斑岩→二长花岗岩,岩石化学成分 SiO_2 增高,K_2O+Na_2O 递增,CaO、MgO、Fe_2O_3+FeO 递减,岩石具同源岩浆的中性→中酸性→酸性演化的特点。

(3)普朗复式斑岩体空间上与图姆沟组的岛弧安山质火山岩密切伴生,成岩时间基本一致或稍晚于火山岩,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,两者具有相近的岩浆源岩和岩浆演化过程。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(Ⅰ型花岗岩)。

(4)根据不同岩石类型间的接触关系、岩石的结构构造和矿物成分特征,将普朗复式斑岩体划分为 3 个侵入阶段。通过同位素年龄测定,初步厘定普朗复式中酸性斑(玢)岩体的成岩时代为:第一阶段侵入岩形成的大致时限为 220.8Ma,主要形成石英闪长玢岩;第二阶段侵入岩时限为 214.8Ma,主要形成石英二长斑岩;第三阶段侵入岩时限为 204Ma,形成花岗闪长斑岩,其成岩成矿时代主要为印支期。

致谢:本文是综合多个项目的研究成果,在野外工作中得到云南省地质调查院黄定柱高级工程师的帮助,在此表示感谢;锆石 U-Pb 定年研究得到中国地质大学(武汉)夏庆霖教授、左仁广副教授及杨玠同学的帮助,在此表示衷心感谢。感谢审稿专家和编辑部老师对本文提出的宝贵建议。

注 释

❶ 云南省地质调查院. 2006. 云南迪庆普朗铜矿地质详查报告(内部).

❷ 云南省地质调查院. 2008. 西南三江南段找矿重大疑难问题研究报告.

参 考 文 献

曹殿华,王安建,黄玉凤,张维,侯可军,李瑞萍,李以科. 2009. 中甸雪鸡坪斑岩铜矿含矿斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成. 地质学报,83(10):1430~1435.

范玉华,李文昌. 2006. 云南普朗斑岩铜矿床地质特征. 中国地质,33(2):352~362.

侯增谦,莫宣学. 1991. 义敦岛弧的形成演化及其对"三江"地区块状硫化物矿床的控制作用. 地球科学——中国地质大学学报,16(2):154~163.

侯增谦,曲晓明,周继荣,杨岳清,黄典豪,吕庆田,唐绍华,余今杰,王海平,赵金花. 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程:花岗岩记录. 地质学报,75(4):17~24.

侯增谦,杨岳清,曲晓明,黄典豪,吕庆田,王海平,余金杰,唐绍华. 2004. 三江地区义敦岛弧造山带演化和成矿系统. 地质学报,13(1):109~120.

李文昌,莫宣学. 2001. 西南"三江"地区新生代构造及其成矿作用. 云南地质,20(4):333~346.

李文昌,曾普胜. 2007a. 云南普朗超大型斑岩铜矿特征及成矿模型. 成都理工大学学报(自然科学版),34(4):436~446.

李文昌. 2007b. 义敦岛弧构造演化与普朗超大型斑岩铜矿成矿模型. 中国地质大学(北京)博士学位论文.

李文昌,尹光候,卢映祥,刘学龙,许东,张世权,张娜. 2009. 中甸普朗复式斑岩体演化及 ^{40}Ar-^{39}Ar 同位素依据. 地质学报,83(10):1421~1429.

李文昌,潘桂堂,侯增谦. 2010a. 西南"三江"多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术. 北京:地质出版社,379~391.

李文昌,尹光侯,卢映祥. 2010b. 西南"三江"格咱岛弧火山-岩浆弧中红山-属都蛇绿混杂岩带的厘定及意义. 岩石学报,26(6):1661~1671.

李文昌,刘学龙,曾普胜,尹光侯. 2011. 云南普朗斑岩型铜矿成矿岩体特征. 中国地质,38(2):403~414.

冷成彪,张兴春,王守旭,秦朝建,苟体忠. 2007. 云南中甸地区两个斑岩铜矿容矿斑岩地球化学特征. 矿物学报,27(3):414~421.

莫宣学,路凤香,沈上越. 1993. "三江"特提斯火山作用与成矿. 北京:地质出版社,58~64.

莫宣学,邓晋福,董方浏,喻学惠,王勇,周肃,杨伟光. 2001. 西南三江造山带火山岩-构造组合及其意义. 高校地质学报,7(2):121~138.

王守旭,张兴春,冷成彪,秦朝建. 2007. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿床地球化学与成矿机理初探. 矿床地质,26(3):277~288.

云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京:地质出版社.

杨岳清,侯增谦,黄典豪,曲晓明. 2002. 中甸弧碰撞造山作用和岩浆成矿系统. 地球学报,23(1):17~24.

尹光侯,李文昌,蒋成兴,许东,李建康,杨舒然. 2009. 中甸火山-岩浆弧燕山期热林复式岩体演化及 Ar-Ar 定年及铜钼矿化. 地质与勘探,45(4):385~394.

曾普胜,莫宣学,喻学忠,侯增谦,徐启东,王海平,李红,杨朝志. 2003. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿. 矿床地质,22(4):393~400.

曾普胜,李文昌,王海平,李红. 2006. 云南普朗印支期超大型斑岩铜矿:岩石学及年代学特征. 岩石学报,22(4):989~1000.

Franklin J M, Lydon J W, Sangster D F. 1981. Volcanic-associated masive sulfide deposits. Economic Geology, 75th Anniversary Volume:485~627.

Lydon J W. 1988. Ore deposit models volcanogenic masive sulfide deposits Part 2:Genetic models. Geosci. Canada,15:43~65.

Le Bas M J, Le M R W, Streckeisen A, Zanettin B A. 1986. A chemical classification of vocanic rocks based on the total alkaline-silica diagram. Journal of Petrology,27:745~750.

Liu Y, Gao S, Hu Z. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen:U-Pb dating, Hf isotopes and traceelements in zircons of mantle xenoliths. Journal of Petrology,51:537~571.

Ohnmto H. 1983. Geological setting of the Kuroko deposits, Part I. of major non-ferrous metal deposits in Western Yunnan. Yunnan Geological history of the Green Tuff region. Economic Geology, 10(1):11～43.

Richard H S. 2010. Porphyry copper systems. Economic Geology, 105(1):3～41.

Sillitoe R H. 1972. A plate tectonic model for the origion of porphyry copper deposits. Economic Geology, 67:184～197.

Simon G. 1999. Epithermal gold mineralization in an old volcano arc: the Jacinto deposit, Canmaguey district, Cuba. Economic Geology, 94:487～506.

The Indo-Chinese Epoch Arc Magmatism of Geza Island-Arc and Porphyry Copper Mineralization in Pulang Sanjiang Orogenic Belt, Southwest China

LIU Xuelong [1,2], LI Wenchang[1,2], YIN Guanghou[2], ZHANG Na[3]

1) *Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing*, 100083; 2) *Yunnan Geological Survey, Kunming*, 650051; 3) *Jinchuan Non-Ferrous Metals Company, Jinchang, Gansu*, 737100

Abstract

Geza island arc located in the southern of Yidun arc of southwest Sanjiang tectonic igneous rock belts in China, it was the result that Ganzi-Litang oceanic crust dived to the Zhongdian Landmasses in late Triassic. The belt is an important discovered copper-polymetallic metallogenic belt in the recent years in China. The regional strong tectonic-magmatic activity runs through the orogenesis of island arc, the rich mineralization developed in the different times and different circumstances of island arc orogenesis, where outputed the large sized Pulang and Xuejiping porphyry-related copper polymetallic deposit. The Pulang porphyry copper deposits is a typical representative of Indosinian porphyry copper deposits, the ore-bearing porphyry SiO_2 content in 60.07%～65.78%, it belongs to the neutral-acid rocks. Al_2O_3 content is 14.80%～15.97%, (K_2O+Na_2O) is 5.79%～10.99%, K_2O/Na_2O is 0.7～1.14, Rittmann index (σ) is 1.02～1.9, Consolidation index (SI) is in the range of 7.65～24.77, Differentiation index (DI) is in the range of 61.17～70.58, so the rocks belong to calc-alkaline rocks series and have the better magma differentiation. A/CNK values in 0.74～0.981, average of 0.87, rocks belong to prospective aluminous granits. Zircon U-Pb dating results show that the quartz diorite formation age was 220.8±4.1Ma, the quartz monzonite porphyry formation age was 214.8±3.5Ma, porphyries rocks metallogenic epoch is mainly concentrated in the Indosinian.

Key words: arc magmatic rocks; porphyry copper deposits; mineralization; indosinian; Geza island arc; Yunnan province