

云南格咱岛弧斑岩-矽卡岩铜、钼(金)矿床成矿系统

刘学龙^{1,2} 李文昌^{1,2} 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)

摘要:格咱岛弧带是西南三江多岛弧盆系中一个主要的地质构造单元,它始于晚三叠世甘孜—理塘洋壳的向西俯冲,燕山期经历了陆内汇聚和造山后伸展作用阶段,区内岩浆活动强烈,成矿作用丰富,是近年来新发现的重要铜多金属成矿带。根据区内岩浆岩和矿床的时空分布,同位素年代学证据,构造环境及成矿作用,将格咱岛弧成矿系统划分为印支期成矿系统和燕山期成矿系统。印支期主要发育了与安山岩同源的壳幔型中酸性岩浆作用,形成斑岩型 Cu 矿成矿系统,燕山期伴随着同碰撞中酸性岩浆活动形成斑岩型 Mo(Cu)及热液型 W(Mo)成矿系统。研究表明,格咱岛弧深部找矿具有较好的资源潜力,其中燕山期 Mo 多金属成矿已显现出良好的找矿前景。

关键词:岛弧;成矿特征;成矿系统;印支期;燕山期;格咱

中图分类号:P618.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)04-1007-

格咱岛弧是西南三江构造-火山岩浆岩带中的重要组成部分,位于义敦岛弧带的南端,是中国近年来新发现的铜多金属矿集区,产出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。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阶段、不同环境,是形成岛弧岩浆岩及成矿作用的有利场所。对区内成矿规律的探索和成矿模式的研究,一直是地质找矿和研究工作的重要问题之一。格咱岛弧经历了晚三叠世的洋壳俯冲造山作用,侏罗纪—白垩纪的碰撞造山和造山后的伸展作用后,岛弧碰撞造山作用已基本完成^[1]。新生代,在青藏高原碰撞隆升的大背景下,发生垂直抬升和大规模的逆冲和推覆,并发育有花岗岩浆活动,但与岛弧岩浆作用相比已具有不同的岩浆来源和地球动力学背景。本文在总结前人研究工作的基础上,结合最新的研究成果,对格咱岛弧斑岩成矿系统进行

了较为全面的研究和总结,并对成矿系统的划分作了新的界定。喜山期的构造岩浆活动已不属于岛弧造山作用的范畴,可作为另一期单独的构造岩浆事件,由于受工作程度和篇幅所限,本文暂不对喜山期的岩浆成矿系统进行讨论。

1 区域成矿背景

1.1 区域构造演化

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,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

收稿日期:2011-12-19;改回日期:2012-03-12

基金项目: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资助成果。

作者简介:刘学龙,男,1983 年生,博士生,矿床学专业,主要从事云南“三江”地区的地质矿产研究工作;E-mail:xuelongliu@foxmail.com。

通信作者: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;E-mail:Lwenchangynddy@163.com。

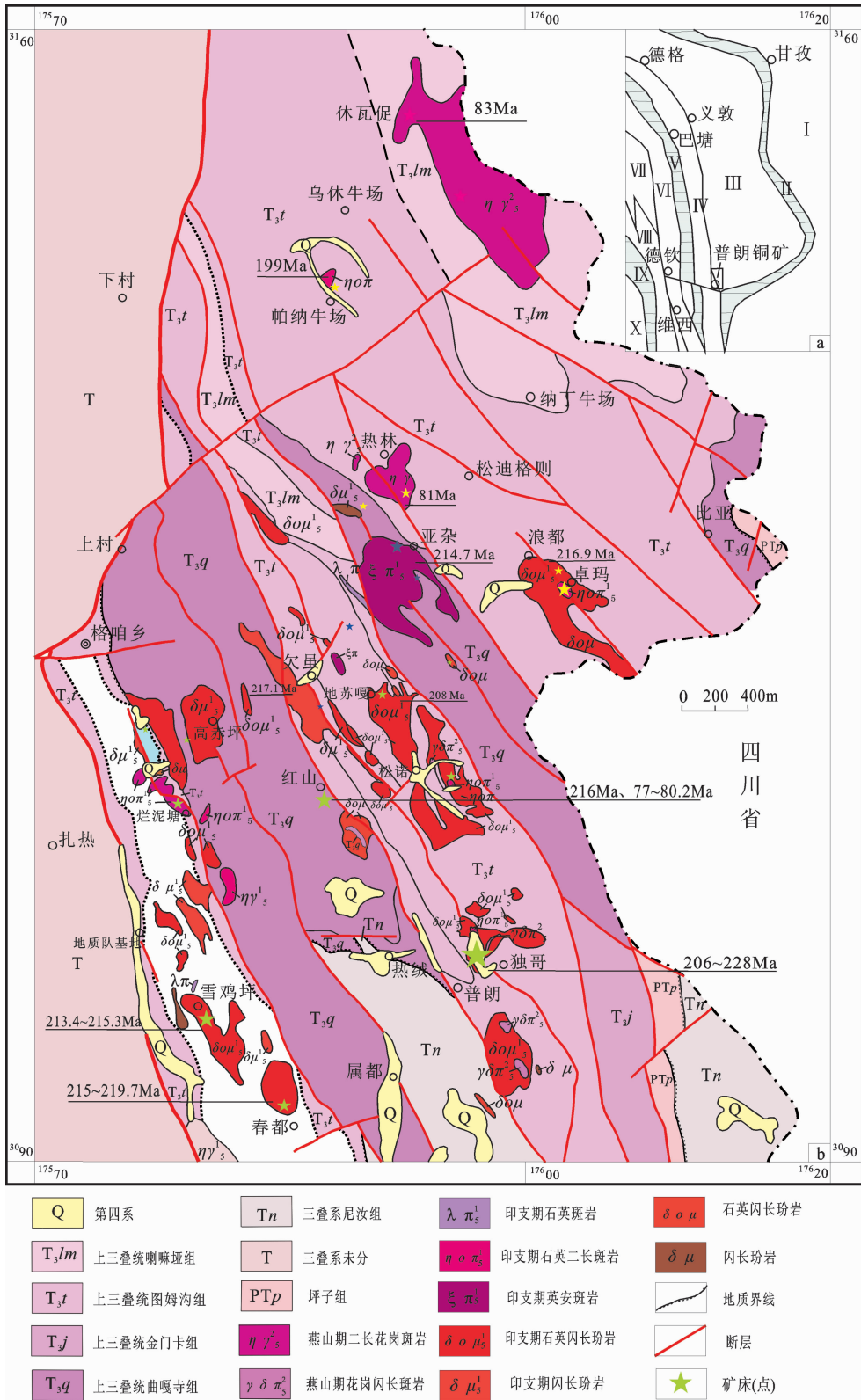


图1 格帕岛弧区域地质图简图(据云南省地质调查局修改)

a-格帕岛弧的大地构造位置;b-岩浆岩和矿产的分布

Fig.1 Simplified geological map of Geza island arc (modified after Yunnan Geological Survey)

a-Tectonic map of Geza island arc;b-Distribution diagram of magmatic rocks and mineral resources

组(T_{3q})、图姆沟组(T_{3t})、喇嘛哑组(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。侏罗纪—白垩纪为陆内汇聚和造山后伸展作用阶段,发育有大规模的同碰撞型中酸性岩浆侵入作用,主要岩石类型为二长花岗岩和钾长花岗岩,属陆壳重熔型花岗岩,晚期的岩浆侵入活动常伴随有 Mo、W、Cu 成矿事件的发生,在构造活动强烈区伴有较强的变质作用及相关的成矿作用。喜马拉雅早期本区主要表现为陆内伸展裂陷,发育有正长(斑)岩—二长岩类岩浆活动。

1.2 区域地球化学及地球物理特征

格咱岛弧侵入岩带的 Cu 含量普遍高于地层含量,因此有岩浆岩活动的区域均有 Cu 的较高的背景(异常)出现,岩浆侵入少的地层均为低 Cu 背景含量区;产于较大的中酸性复式岩体($\delta o \mu$)中的斑岩小侵入体($\gamma \delta \pi$ 、 $\eta o \pi$ 、 $\lambda \pi$ 等)有较高的 Cu、W、Mo、Au、Ag 等背景含量,显示区内印支期、燕山期侵入岩 Cu 具有很好的含矿性,对形成斑岩(或矽卡岩)型铜矿极为有利。燕山期黑云二长花岗岩($\eta \gamma$ 、 $\eta \gamma \pi$)有较高的 W、Mo、Cu 背景含量,二长花岗斑岩 W 含量为 27.35×10^{-6} ,Mo 含量为 9.4×10^{-6} ,黑云二长花岗岩 W 含量为 8.87×10^{-6} ,Mo 含量为 2.66×10^{-6} ,它们远远高于地层含量,是区内休瓦促、热林石英脉型 W、Mo 多金属矿(床)的成矿

母岩,对成矿十分有利。

格咱岛弧在区域上主体为一个巨大的近 SN 向重力低异常区和低缓正磁异常带,与印支期中酸性火山岩带相一致,在中酸性岩浆岩体蚀变带形成中等强度的局部异常,走向上呈串珠状分布。铜多金属矿床的分布表现为以红山为中心的东西轴向椭圆状正弱磁异常(0~100 nT)边缘或正负磁异常过渡带。遥感影像解译,区内线环构造发育,中小型环形构造、岩浆岩环、火山环交叠相错,呈近 SN 向串珠状展布。区域重力、航磁资料结合地质、遥感成果综合分析表明,在重力低值带内赋存诸多隐伏中酸性岩体,从北向南为休瓦促、热林、红山、春都、阿热等。对寻找斑岩型铜矿、矽卡岩型铜多金属矿床具有重要意义。

2 典型矿床特征

2.1 雪鸡坪斑岩型铜矿

雪鸡坪斑岩铜矿位于香格里拉县格咱乡,为一开采时间较早的老矿区。矿体受印支期壳幔型中酸性斑(玢)岩控制,西侧靠近格咱深大断裂。出露地层为图姆沟组二段的砂板岩—凝灰岩—熔岩。构造行迹以断裂发育为特征,主要呈 NW 向展布。火山岩岩石类型有蚀变安山岩、蚀变英安岩及蚀变安山质火山角砾岩、安山质晶屑凝灰熔岩等。侵入岩仅为浅成—超浅成斑(玢)岩,斑(玢)岩体构造裂隙发育,岩石蚀变强烈。主要岩石类型有石英闪长玢岩、石英二长斑岩,具从中性→酸性分异演化的趋势;常量元素分析结果表明(表 1), SiO_2 含量为 59.6%~63.2%,属中

表 1 格咱岛弧斑岩铜矿主量元素组成/%

Table 1 Major element content of main porphyry copper deposits in Geza island arc

编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Lost	FeO	H ₂ O ⁺	σ
XJP-01	60.44	14.37	7.1	2.64	2.37	3.02	4.61	0.05	0.82	0.37	4.07	1.7	0.81	3.16
XJP-03	61.72	11.67	8.32	2.92	4.07	2.14	2.32	0.06	0.47	0.23	5.3	1.75	0.95	3.21
XJP-05	59.16	13.34	9.48	2.93	2.55	1.34	3.66	0.06	0.9	0.33	3.94	2.1	1.15	1
XJP-06	63.2	11.83	7.31	2.52	2.78	1.53	3.51	0.04	0.72	0.28	4.26	2	1	1.44
PL-034	62.82	14.75	4.47	4	5.78	5.21	0.78	0.06	0.79	0.44	0.83	1.9	0.78	1.83
PL-035	64.31	15.59	3.43	3.45	4.67	5.08	1.25	0.04	0.81	0.42	0.87	2.2	0.77	1.9
PL-048	62.07	14.57	6.74	3.76	3.01	2.78	5.69	0.05	0.76	0.4	0.075	5.9	<0.10	4.08
PL-058	65.86	12.57	3.76	1.53	4.54	1.21	3.45	0.05	0.46	0.22	6.34	2.9	1.78	0.92
PL-060	65.78	15.52	5.23	1.73	3.61	4.02	3.13	0.06	0.5	0.19	0.12	4.05	<0.10	2.33
PL-061	65.15	15.97	4.77	1.29	3.59	3.83	3.19	0.06	0.46	0.2	1.42	3.9	1.04	2.28
PL-062	64.95	15.63	5.03	1.9	3.29	3.57	4.59	0.05	0.5	0.24	0.16	4.15	<0.10	1.83
HS-02	68.51	13.65	5.71	2.09	4.33	2.08	1.56	0.03	0.69	0.12	1.21	4.65	0.46	0.53
HS-03	69.81	13.54	4.46	0.69	0.67	2.79	5.57	0.03	0.53	0.27	1.54	2.8	0.49	2.62
HS-04	73.02	13	3.43	0.46	0.55	1.75	6.53	0.02	0.29	0.11	0.74	2.35	0.47	2.3

注:分析测试单位:为核工业北京地质研究院分析测试中心。

酸性岩,全碱含量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)为 4.46%~7.63%,平均达 5.53%,里特曼指数(σ)为 1~3.21,平均 1.71,岩石属钙碱性岩石系列。斑岩体蚀变分带较为典型:钾化带→绢英岩化带→青磐岩化带(图 2)。矿体主要产出在钾化带和绢英岩化带的叠加部位。

雪鸡坪矿化斑岩体地表出露面积约 0.98 km^2 。呈一 NW 向延伸的小岩株,斑岩体为复式岩体,由石英二长闪长玢岩、石英闪长玢岩及石英二长斑岩的涌动侵入所形成。矿区矿化带可分为内部黄铜矿化带及外带黄铁矿化带。黄铜矿化带分布于岩体中的钾化带及石英绢云母化带中。矿区蚀变类型多样,主要有钾长石化、黑云母化、硅化、绢云母化、碳酸盐化、伊利石化和绿泥石化,蚀变分带明显。矿体赋存于热液活动的重叠地区,蚀变越强,矿化越好。矿体主要呈 NW 向透镜状产出,产状较陡,倾角 $60^\circ\sim 70^\circ$;主矿体(KT1)长 400~650 m,厚 30~80 m,延伸长 300~450 m(图 3)。矿石品位低,在圈定的矿体中常有夹石,品位变化较大,铜品位为 0.53%,Mo

0.0037×10^{-2} ,Au 0.07 g/t,Ag 1.35×10^{-6} 。矿石以自形粒状、交代结构为主,具浸染状、细脉浸染状构造。金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿、辉钼矿、闪锌矿、硫砷铜矿。脉石矿物为石英、绢云母、钠长石、方解石、白云石等。赋矿岩石主要为石英二长斑岩型、石英闪长玢岩,矿床属斑岩型铜矿床。

成岩成矿时代的研究表明,石英闪长玢岩全岩 Rb-Sr 等时年龄为 237.48 Ma、石英二长斑岩全岩 Rb-Sr 等时年龄为 230 Ma^①;角闪石石英闪长玢岩的 Ar-Ar 年龄为 (249.92 ± 4.99) Ma^②,锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (215.3 ± 2.3) Ma^③;绢云岩化带内含矿斑岩的年龄为 (215.2 ± 1.9) Ma^④;项目组研究获得雪鸡坪铜矿 1 号矿体中含石英闪长玢岩的黄铁矿 Re-Os 同位素年龄 (227 ± 11) Ma(本文)。结合含矿岩体侵入最新地层为晚三叠世,其成岩成矿时代应为印支晚期。

2.2 普朗斑岩型铜矿

普朗斑岩型铜矿位于格咱岛弧红山复式背斜南

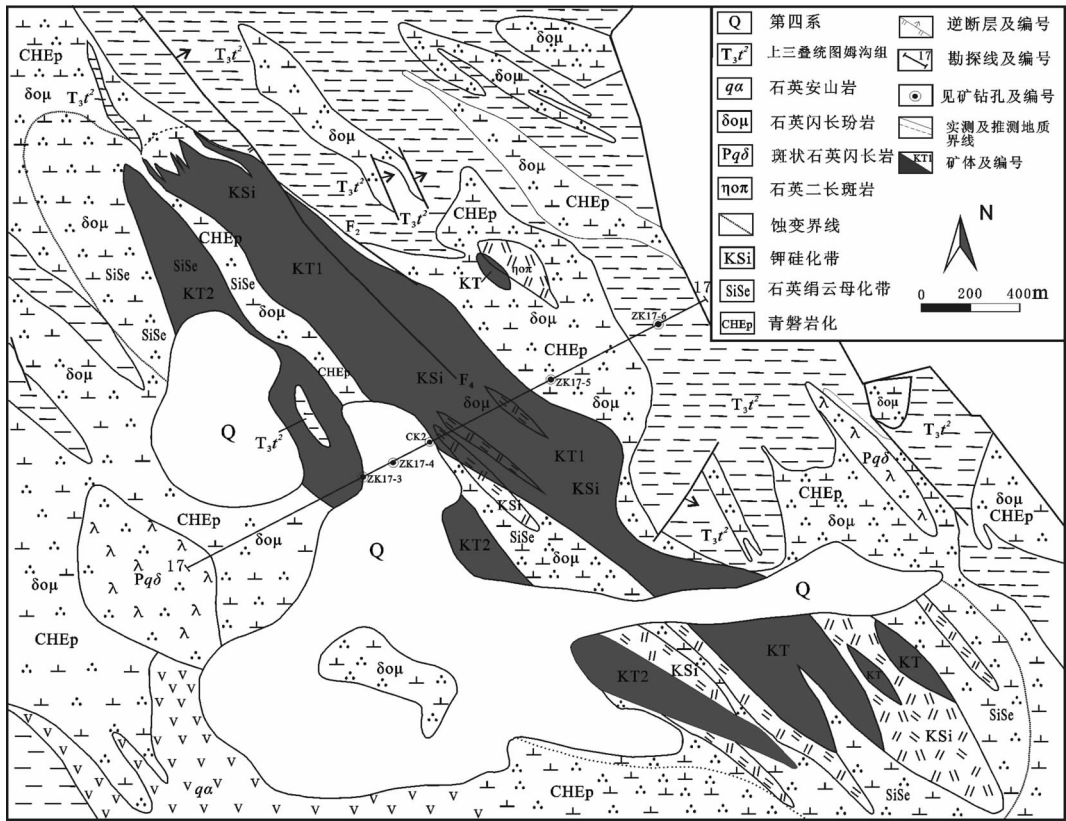


图 2 雪鸡坪斑岩型铜矿地质略图(据云南省地质调查院修编)

Fig.2 Sketch geological map of the Xuejiping porphyry deposit

① 云南省地质矿产局, 1:20 万古学幅区域地质报告, 1984.

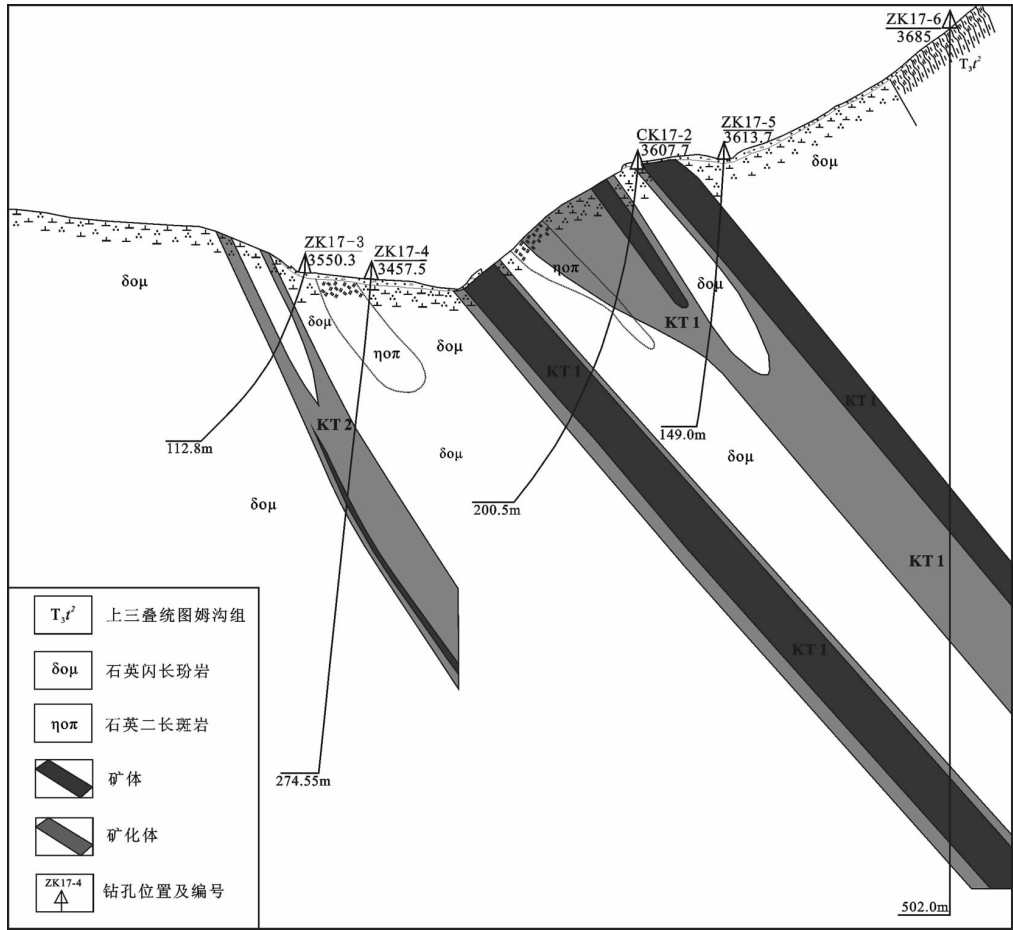


图 3 雪鸡坪斑岩型铜矿 17 号线地质剖面图(据云南省地质调查院修编)
Fig.3 Geological section along No. 17 line in the Xuejiping porphyry deposit

段东翼的次级黑水塘—牙树背斜中, 出露地层主要为上三叠统图姆沟组二段的砂板岩夹安山岩及曲嘎寺组三段的灰岩、大理岩夹砂板岩。NW 向的普朗河断裂和 NEE 向的力中全达主干断裂控制了普朗复式岩体的展布。普朗斑岩型铜矿主要产于普朗复式斑岩体内, 岩体呈不规则状出露地表, 面积约 8.9 km², 岩性主要为石英闪长玢岩、石英二长斑岩、花岗闪长斑岩(图 4)。岩石常量元素分析结果表明(表 1), SiO₂ 含量为 62.07%~65.86%, 岩石属中酸性岩, 全碱含量(Na₂O+K₂O)较高, 为 4.66%~8.16%, 平均 6.83%, 里特曼指数(σ)为 0.92~4.08, 平均 2.36, 岩石属钙碱性岩石系列。

矿区内地表圈出铜矿化面积 3.59 km², 分为南、北 2 个矿段。含矿岩石主要为石英闪长玢岩、石英二长斑岩。目前南矿段的 KT1、KT10 等矿体已有钻孔控制。从目前工作程度来看, 区内可能存在多期次的

岩浆—成矿热液活动, 出现多个矿化浓集中心。位于矿区中南部的 KT1 是区内铜矿化最好的斑岩矿体之一, 露头面积约 0.32 km²。工程揭露表明, 矿化均匀、品位稳定, 铜品位为 0.3%~1.74%, 平均达 0.68%, 伴生 Au 0.25 g/t。岩体蚀变分带明显(图 5), 由内向外可分为: 钾化带(黑云母化、钾长石化)→绢英岩化带(绢云母化、硅化)→青磐岩化带(绿泥石化、绿帘石化), 在矿化岩体中, 以钾化带、绢英岩化带铜矿化最为富集^[9]。矿体控制厚度 17.0~750.9 m, 厚度变化系数 52.03%, 厚度变化稳定; 铜品位 0.20%~3.74%, 平均为 0.57%, 品位变化系数 68.69%。矿石具粒状结构, 细脉状、浸染状、斑团状构造。此外, 对 Au、Pd、Pt 成矿元素的研究结果表明, 普朗斑岩铜矿中 Au、Pd、Pt 元素较为富集, Au 含量为 0.05×10⁻⁶~3.91×10⁻⁶、Pd 的含量为 3.98×10⁻⁹~22.3×10⁻⁹、Pt 为 0.98×10⁻⁹~3.85×10⁻⁹(表 2)。金属矿物较为简单, 主要有黄铜

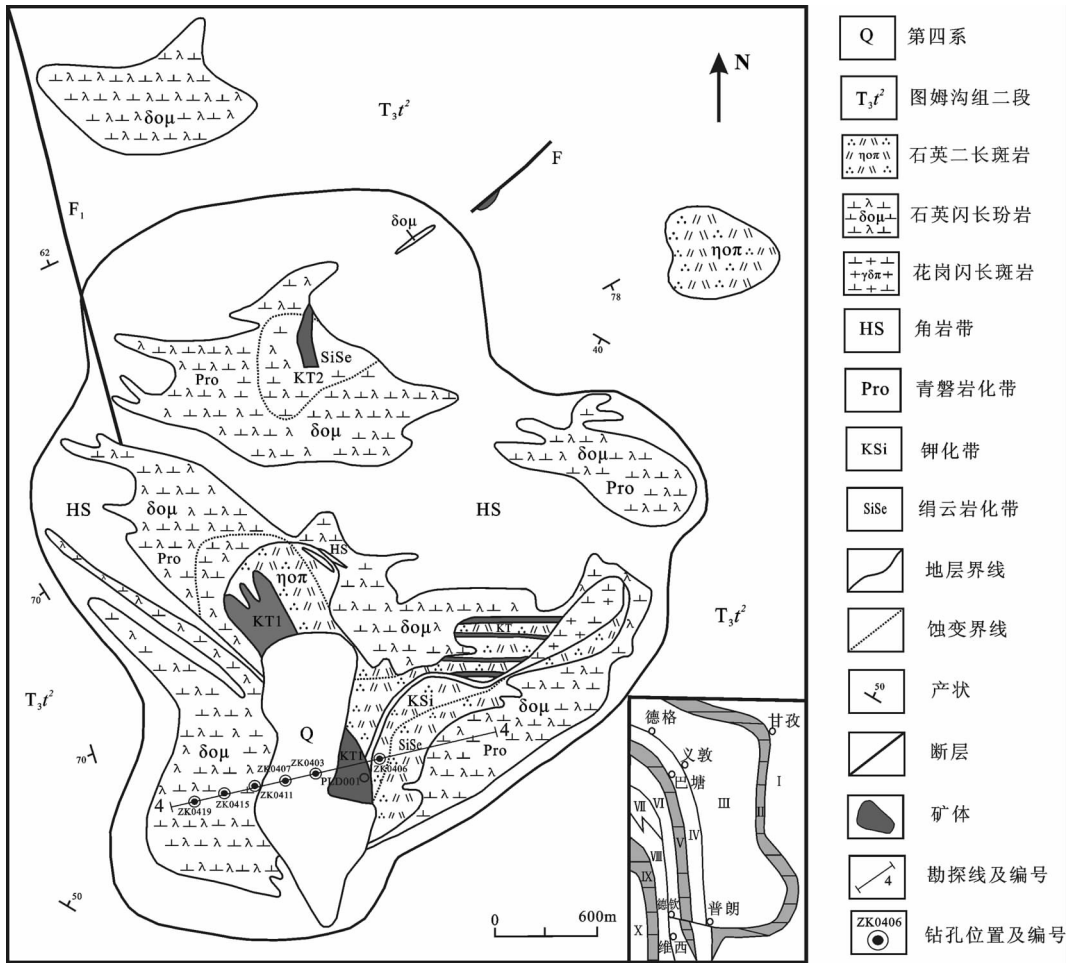


图4 普朗铜矿床地质略图(据云南省地质调查院修编)
Fig.4 Sketch geological map of the Pulang porphyry deposit

表2 普朗斑岩型铜矿 Au、Pd、Pt 元素分析结果

Table 2 Au, Pd, Pt analyses of the Pulang porphyry copper deposit

样品编号	Au/10 ⁻⁶	Pd/10 ⁻⁹	Pt/10 ⁻⁹	Pd / Pt	样品编号	Au/10 ⁻⁶	Pd/10 ⁻⁹	Pt/10 ⁻⁹	Pd / Pt
PL-008	<0.05	7.75	2.36	3.28	PL-022	3.91	18.6	2.52	7.37
PL-013	1.52	6.89	3.77	1.83	PL-023	0.34	22.3	7.85	2.84
PL-014	0.64	3.98	2.26	1.76	PL-039	0.25	5.03	1.49	3.38
PL-018	<0.05	4.53	1.88	2.41	PL-044	<0.05	2.97	0.98	3.03
PL-021	0.13	9.90	3.30	3.00	PL-065	0.20	6.36	2.86	2.22

注:测试单位为国土资源部昆明矿产资源监督检测中心。

矿、黄铁矿、少量辉铜矿、斑铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿；脉石矿物有石英、长石、黑云母、角闪石、绢云母及绿泥石、绿帘石、方解石、铁白云石等，黄铜矿分布于脉石矿物中。

普朗铜矿为格咱岛弧成矿带印支期最为典型的斑岩型铜矿床，曾普胜等(2006)测得石英二长斑岩

中2组黑云母 Ar-Ar 年龄分别为(214.58±0.91) Ma、(216.0±1) Ma^[6]；含矿石英二长斑岩中辉钼矿 Re-Os 同位素年龄为(213±3.8) Ma^[1]；杜杨松等(2007)对普朗复式岩体的研究中利用锆石 Pb-Pb 定年，获得斑(玢)岩体的形成时代为 206.3~221 Ma^[7]；王守旭等(2008)对矿化石英二长斑岩的 U-Pb 定年结果为

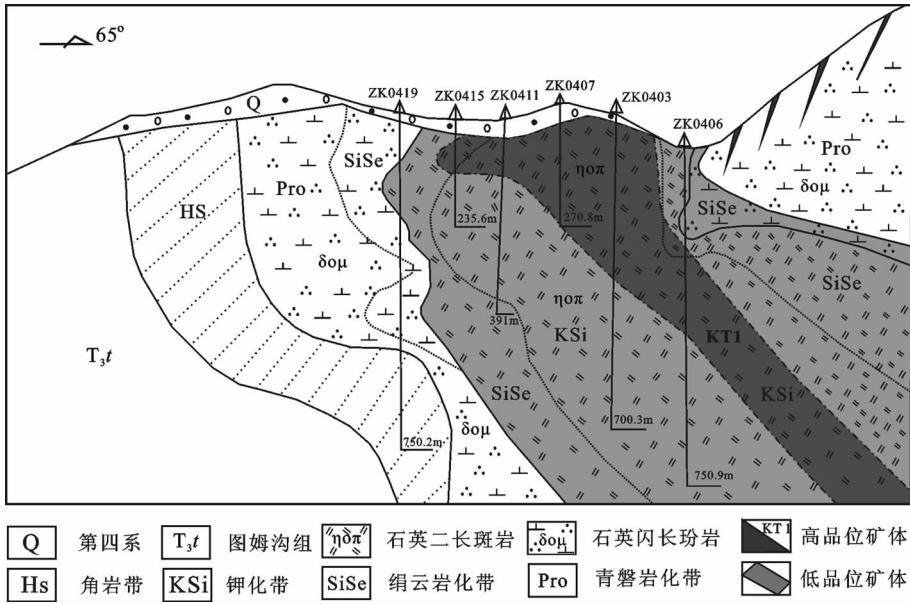


图 5 雪鸡坪斑岩型铜矿 4 号线地质剖面图(据李文昌等,2007)

Fig.5 Geological section along No. 4 line in the Pulang porphyry deposit (after Li et al, 2007)

226~228 Ma^[8],不同的测试方法,所获得的成岩成矿年龄也存在较大的差异。普朗斑岩铜矿与成矿关系密切的斑岩体的岩石类型主要为石英闪长玢岩和石英二长斑岩,通过系统的锆石 U-Pb 测年方法获得,含矿石英闪长玢岩的形成年龄为(220.5±3.2)Ma,含矿石英二长斑岩的形成年龄为(214.5±2.2)Ma,其成岩成矿的峰值主要集中于 220~210 Ma(另有发文)。

2.3 红山斑岩—矽卡岩型铜矿

红山铜矿区位于香格里拉县格咱乡红山一带,与雪鸡坪铜矿毗邻,处于普朗—红山铜多金属矿亚带西侧。矿区主要出露上三叠统图姆沟组一段砂板岩夹结晶灰岩、中酸性火山岩,与火山岩同源的侵入体,地表仅有零散的闪长玢岩岩墙和岩枝出露(图 6),矿区东部北段(17 号勘探线)在 150 m 深处发现隐伏石英二长斑岩—花岗斑岩,推测深部存在大的隐伏岩体,地表见大面积角岩化及矽卡岩化蚀变。隐伏斑岩体的常量元素分析表明(表 1),岩石 SiO₂ 含量为 68.51%~73.02%,平均为 70.45%,属酸性岩,全碱含量(Na₂O+K₂O)较高,为 3.64%~8.25%,平均达 6.76%,里特曼指数(σ)为 0.53~2.62,平均为 1.82,岩石属钙碱性岩石系列。

经工程揭露隐伏石英二长斑岩—花岗斑岩岩枝

具较好的钼矿化(图 7),外接触带矽卡岩铜矿化发育。角岩中可见沿裂隙发育的细脉、网脉状 Mo、Cu 矿化。据 ZK17-7 工程揭露见厚度较大的 Cu、Mo 矿体(孔深 558.80 m),其中 330~370 m 见 Cu 矿体,该层矿为原 V₂ 矿体向西的延伸,矿化连续,含矿岩性为矽卡岩,厚度达 56 m,Cu 品位平均 0.6%;503 m 以后揭露到含 Mo 石英二长斑岩体,斑岩体为细—中粒状,结晶较好,具有完整的蚀变分带,全岩矿化,控制矿体厚度 63.80 m,Mo 品位为 0.072%。红山铜钼矿区已查明钼矿体 1 个,平均含 Mo 为 0.047%。5 个矽卡岩带,都发育有不同程度的铜多金属矿化。金属矿物以黄铜矿、辉钼矿为主,其他金属矿物有闪锌矿、方铅矿、磁铁矿、斑铜矿、白钨矿、黝铜矿、辉铜矿、辉铋矿、黄铁矿和磁黄铁矿等。矿石以晶粒状结构为主,次为固溶体分解结构,具浸染状、斑点状、条带状和细脉状构造。红山及其外围的红山牛场 2 个矿区,共探明铜资源储量约 46 万 t,矿床平均品位大于 1%。

红山铜多金属矿床的成矿时代问题一直存在较大的争议,石英二长斑岩隐伏岩体的全岩 Rb-Sr 等时年龄为 216 Ma^[9],徐兴旺等(2006)获得辉钼矿的 Re-Os 年龄为(77±2)Ma^[9];李健康等(2008)获得矽

① 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志,1990.

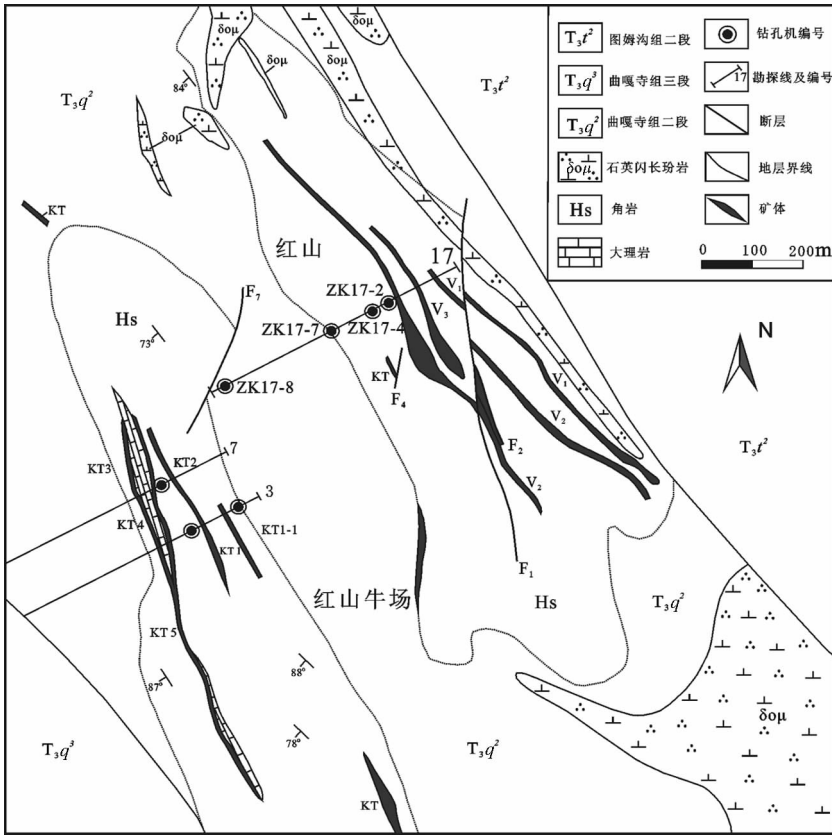


图6 红山矽卡岩—斑岩型铜矿地质图(据云南省地质调查院修编)
Fig.6 Sketch geological map of the Hongshang skarn-porphry copper deposit

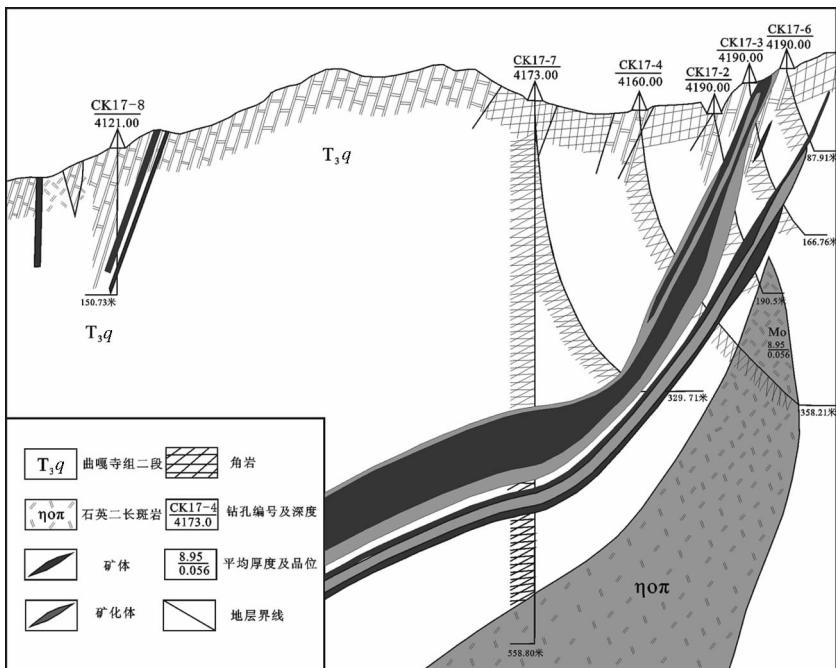


图7 红山矽卡岩—斑岩型铜矿 17 号线地质剖面图(据云南省地质调查院修编)
Fig.7 Geological section along No. 17 line in the Hongshang skarn-porphry copper deposit

卡岩型矿石中的黄铁矿 Re-Os 年龄为 $(77 \pm 18) \text{Ma}^{[10]}$; 李文昌等(2011)获得红山深部隐伏岩体中辉钼矿 Re-Os 年龄为 $80.2 \text{Ma}^{[11]}$, 上述同位素资料表明, 红山矿床的成矿时代主要为燕山晚期。

3 成矿系统的控制因素

本区地处德格—中甸陆块东缘, 印支期义敦岛弧带的南段。在其成矿系统的作用构成中, 主要的控矿因素有: 岩浆岩、岩浆侵位地层、热液蚀变作用、构造裂隙作用。它们之间既有密切的联系, 又有一定的独立性, 并在成矿系统中发挥着不同的作用。

3.1 岩浆岩

与岛弧岩浆-热液成矿作用有关的岩浆岩几乎仅为浅成—超浅成斑(玢)岩, 特别是斑岩型矿床更是如此。因此, 斑(玢)岩体的存在与否, 是能否形成矿床的决定性因素。在我国斑岩型矿床中, 矿体主要赋存在偏酸、偏碱性的斑岩中, 如三江地区的玉龙斑岩铜矿带, 含矿斑岩体主要有石英二长斑岩和正长花岗斑岩组成^[12]。矿化主要趋向于在斑岩中发生, 这说明 Cu、Au、Mo、PbZn、Ag、W 这些金属成矿元素更适宜在偏碱性熔体中富集。在斑岩和玢岩均发生矿化时, 其中富含石英的斑(玢)岩中矿化更为富集, 也说明酸性岩浆流体是斑岩型 Cu、Au(Mo)等金属成矿元素迁移、富集的良好介质。

3.2 岩浆侵位的地层

格咱岛弧岩浆-热液作用有关的斑岩型矿床和热液脉型矿床, 主要分布于图姆沟组二段, 该段是上三叠统中火山岩最发育的层位, 在其上、下段中, 主要是海相碎屑沉积岩。这说明了斑(玢)岩的成矿作用与火山岩存在较为密切的联系。

3.3 热液蚀变作用

在岩浆-热液成矿作用有关的矿床中, 热液蚀变较为发育, 蚀变范围远大于矿体, 可以说没有热液蚀变就没有斑岩型矿床的形成。Cu、Au、Mo 等金属成矿物质主要以络合物形式存在于岩浆热液中, 在含矿流体的物质迁移过程中, 因物理化学条件的差异, 而发生物质交换和蚀变交代作用, 络合物发生分解而产生金属成矿元素的富集。因此, 热液蚀变是产生矿化的重要条件之一。

3.4 构造裂隙作用

在洋壳俯冲造山作用过程中, 金属矿床的形成与岩浆热液活动具有密切的联系, 因此含矿热液运

移的通道, 矿质沉淀的构造空间, 及构造裂隙的存在则直接影响着矿床的形成和发育。区内, 复背斜构造的存在有利于深部岩浆流体向地壳浅部运移和汇聚, 但大断裂的活动, 则是诱发岩浆及流体向地表运移并改变区域地球物理化学场的重要条件。如前所述, 格咱深大断裂的存在及长期活动对格咱岛弧带岩浆活动有重要影响。格咱深大断裂首先限制了岩浆活动仅发育在断裂的东侧, 而断裂附近次一级构造裂隙的发育, 为浅成—超浅成侵入岩的活动创造了极其有利的条件。

4 成矿系统分析

4.1 成矿系统的划分

成矿系统研究是系统科学方法在矿床学的一种创新应用, 是指在一定的地质时空域中, 控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用动力学过程, 以及所形成的矿床系列、异常系列构成的整体, 是具有成矿功能的自然系统^[13]。综合区内目前已有的同位素资料, 表明格咱岛弧岩浆活动和成矿事件的时限主要集中在 $230 \sim 210 \text{Ma}$ 、 $90 \sim 70 \text{Ma}$ (图 8)。本文应用成矿系统研究方法, 根据目前的地质工作程度, 格咱岛弧成矿带岩浆岩和矿床的时空分布、类型, 同位素年代学证据, 构造环境及成矿作用, 将格咱岛弧成矿系统分为印支期成矿亚系统和燕山期成矿亚系统, 其矿床特征及实例参见表 3。

4.1.1 印支期斑岩成矿亚系统

三叠纪晚期格咱岛弧火山活动强烈, 形成曲嘎寺组的基性火山岩和图姆沟组的中酸性火山熔岩, 就火山作用强度而言, 图姆沟的火山活动强度明显较高, 与成矿作用关系较为密切。图姆沟组的中酸性火山熔岩中以安山岩占主导, 岩石具高硅、富碱、钠质的特点, 属高钾钙碱性—钙碱性岩石系列, 岩石富集轻稀土元素。在格咱地区, 印支期洋壳俯冲造山作用形成的与安山岩同源的壳幔型中酸性浅成斑(玢)岩发育, 主要有东西 2 个 NNW 向斑岩带所构成, 矿床与斑(玢)岩存在较为密切的成因联系, 主要呈复式岩体产出, 由闪长玢岩、石英闪长玢岩、石英二长斑岩、花岗闪长斑岩所组成。岩石具有高钾、富碱的特点, 属高钾钙碱性—钾玄岩岩石系列, 多富集轻稀土元素, 微量元素表现出 Cu、Pb、Au、Mo、Ag 等元素强烈富集, Rb、Nb、P、Ti 亏损的特征。

斑(玢)岩与区内中酸性火山岩在地球化学组成

表 3 格咱岛弧主要铜多金属矿床特征
Table 3 Geological characteristics of main copper polymetallic deposits in the Geza island arc

序号	矿床名称	主成矿元素	矿床类型	矿区主要地层或围岩	与成矿有关岩体	金属矿物	围岩蚀变	成矿时代/Ma	规模
1	普朗斑岩铜矿	Cu-Au-Mo-(PGE)	斑岩型	上三叠统图姆沟组绢云板岩、夹变质砂岩、安山岩	石英闪长斑岩、石英二长斑岩、花岗岩闪长岩	黄铜矿、斑铜矿、铜蓝、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、辉钼矿、自然金	钾长石化、黑云母化、硅化、绢云母化、黏土化、绿泥石化	214.6~216 (Ar-Ar) ^[6] 213±3.8 (Re-Os) ^[1] 206.3~221 (Pb-Pb) ^[7] 214.5~220.5 (U-Pb)(本文)	超大型
2	雪鸡坪斑岩铜矿	Cu-Mo-Au-Ag	斑岩型	上三叠统图姆沟组二段的砂岩、砂板岩、凝灰岩	石英闪长斑岩、石英二长斑岩	黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、辉钨矿、闪锌矿、硫锑铜矿	钾化带、绢英岩化、伊利石-碳酸盐化	249.92±4.99 (Ar-Ar) ^[2] 215.2±1.9 (U-Pb) ^[4] 227±11 (Re-Os)(本文)	大型
3	春都铜矿	Cu-Pb-Zn	斑岩型	上三叠统图姆沟组变质粉砂质绢云板岩、变质粉砂岩	石英安山岩、石英闪长斑岩、石英二长斑岩	黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼矿、赤铁矿、蓝铜矿	钾化、硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化	219.7±1.8 (U-Pb) ^[4]	中型
4	烂泥塘铜矿	Cu-Au(P-GE)	斑岩型	上三叠统图姆沟组火山岩-碎屑岩复理石建造	石英二长斑岩、石英闪长斑岩	黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿	硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化、绿帘石化、高岭石化、	印支期	小型
5	浪都铜矿	Cu-Pb-Zn-Ag-Mo-Au	砂卡岩型	上三叠统图姆沟组段的碎屑岩和碳酸盐岩	石英二长斑岩、花岗岩闪长斑岩	磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、斑铜矿	砂卡岩化、角闪化、绿泥石化、绿帘石化	216.36±4.34 (Ar-Ar) ^[2]	中型
6	久县铜铅锌多金属矿	Cu-Pb-Zn-Ag-Au-Mo	斑岩型	上三叠统图姆沟组一段、二段	闪长斑岩、二长斑岩	黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿及闪锌矿	角闪化、绿泥石化、绿帘石化、硅化	217.1±1.5 (U-Pb) ^[5]	小型
7	地苏嘎铜多金属矿	Cu-Pb-Zn-Au-Ag	斑岩型	上三叠统图姆沟组类质板岩、安山岩、英安岩、流纹岩	石英闪长斑岩	黄铁矿、孔雀石、黄铜矿、蓝铜矿、方铅矿、磁黄铁矿	钾硅化、绢英岩化、青磐岩化	203.0±0.5 (U-Pb)(本文) 208.5±1.0 (U-Pb)(本文)	小型
8	松诺铜矿	Cu-Pb-Zn-Mo	斑岩型	上三叠统图姆沟组磷质板岩、安山岩	石英闪长斑岩、黑云石英二长斑岩	黄铜矿、磁黄铁矿、磁铁矿、方铅矿、闪锌矿	硅化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化	220.9±3.5 (U-Pb) ^[6]	中型
9	卓玛铜多金属矿床	Pb-Zn-Cu-Ag-Mo-Au	斑岩型	上三叠统图姆沟组二段板岩、变质砂岩、安山岩-英安岩	石英二长斑岩、石英闪长斑岩	黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿	硅化、绢云母化、角闪化、砂卡岩化	印支期	中型
10	亚东铅锌银多金属矿	Pb-Zn-Ag-Cu	热液脉型	曲嘎寺组碎屑岩夹中-基性火山岩	英安斑岩	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、锡石	角闪化、硅化、绢云母化、角闪化、砂卡岩化	214.7±1.1 (U-Pb) ^[7]	小型
11	帕纳牛场铜矿	Sb-Pb-Zn	脉状热液型	图姆沟组二段板岩、粉砂质绢云板岩、变质砂岩、安山岩-英安岩	石英二长斑岩	辉钼矿、辉钨矿、黄铁矿	硅化、绢英岩化、黄铁矿化	199 (Ar-Ar) ^[8]	中型
12	红山铜矿(红山牛场)	Cu-Pb-Zn-Mo-W	斑岩-砂卡岩型	上三叠统图姆沟组段砂板岩、英结晶灰岩、中酸性火山岩	闪长斑岩、石英二长斑岩体	黄铜矿、辉钼矿、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿	角闪化、砂卡岩化、硅化、黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化	77±2 ^[9] 77±18(Re-Os) ^[10] 80.2(Re-Os) ^[11]	大型
13	热林铜矿	Cu-Mo-W	热液脉型	上三叠统图姆沟组二段的砂板岩夹火山岩	黑云母二长花岗岩、花岗岩	辉钼矿、黄铁矿、白钨矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿	硅化、绿泥石化、绢云母化	81.2±2.3 (Re-Os) ^[11] 82.01±0.86(Ar-Ar)	小型
14	休瓦促	W-Mo-Cu	热液脉型	上三叠统喇嘛组绢云斑岩夹石英杂砂岩	黑云母二长花岗岩	辉钼矿、白钨矿、黄铁矿、黄铜矿	黄铁矿化、硅化、绿泥石化、绢云母化	83±1 (Re-Os) ^[11]	中型

注:无同位素数据的成矿时代参考区域资料侵入岩的成矿或成矿时代。

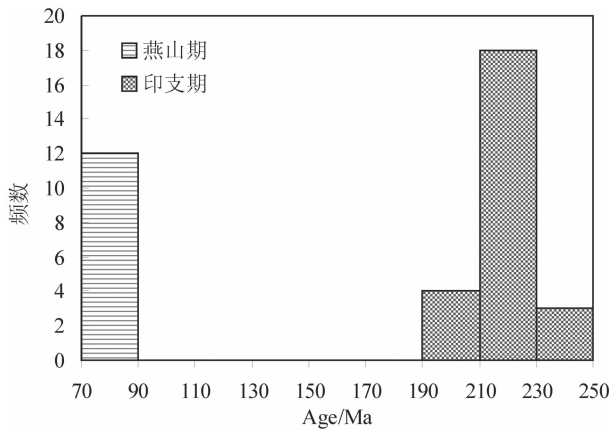


图 8 格咱岛弧斑岩成矿系统成岩成矿时代直方图

Fig.8 Histogram of the ages of the main copper-polymetallic deposits in the porphyry metallogenic system of Geza island arc

的相似性表明,两者具有相同或相似的轴脊分布,矿床的形成和岩浆作用形成的含矿热液直接相关。由于岩浆作用强度、构造环境的局部差异,导致在空间上形成了不同规模、不同类型的矿床。主要表现在岩体内或外接触带产出斑岩型 Cu(Au)矿床(雪鸡坪、普朗等)、矽卡岩型 Cu(Fe)矿(浪都)及矽卡岩-斑岩型 Cu(Pb-Zn)矿(红山),在斑岩活动的边缘形成产于构造角砾岩中的热液型含金富银的 PbZn (Cu)矿床(亚杂)。目前,格咱岛弧已知的大部分矿床多分布在此亚系统中,印支期形成的斑岩型、矽卡岩型矿床在时间、空间上的共生,构成了一个较为完整的斑岩铜矿成矿系统。

4.1.2 燕山期斑岩成矿亚系统

在格咱岛弧北段翁水地区有燕山晚期大规模壳型花岗岩浆的侵入活动,位于沃迪措断裂以东,分布于格咱岛弧的弧后地带,侵位地层为上三叠统图姆沟组和喇嘛垭组中,呈岩株、岩瘤状组成复式岩体,以热林、休瓦促岩体最为典型,复式岩体由二长花岗岩、黑云钾长花岗岩组成,呈 NNE 向延伸,岩石具高硅、高钾、富铝的特点,属弱铝质—过铝质岩石,具 A 型花岗岩的特征。稀土元素含量较高,微量元素 Mo、W、Cu、Ag 含量明显高于维氏值,强不相容元素 Rb 和高场强元素 Nb、Ta 相对富集, Sr 强烈亏损,属造山期后花岗岩类。

格咱岛弧燕山期成矿作用与造山期后花岗岩的岩浆作用关系密切,由于岩浆作用形成的热液可以

继承岩浆成分,因此岩浆中成矿元素富集特征可以反映到岩浆热液成矿作用中^[19],燕山期岩浆富集 Mo、W、Cu、Ag、Au 等金属成矿元素,因此为 W、Mo 多金属成矿作用提供了必要的物质基础,并形成了与二长花岗岩有关的石英脉型 Mo(W)矿(休瓦促、沙都格勒)及沿构造破碎带发育的含 Au-Ag-W-Sn 的石英脉型多金属矿床(热林、沃迪措)。中部的红山深部(150 m)发现隐伏石英二长斑岩-花岗斑岩体,岩体内发育有较好的 Mo(Cu)矿化,辉钼矿的 Re-Os 年龄为 80.2 Ma^[11]。南部铜厂沟经工程揭露也发现了深部的隐伏岩体,主要为黑云母二长花岗岩及花岗闪长岩,岩体内 Mo 矿化发育较好,目前云南省地质调查院正在从事相关的地质找矿工作,有望获得更大的找矿突破。综上所述,格咱岛弧燕山期侵入岩带呈南北向叠加于印支期岛弧岩浆岩带上,矿床多产于复式岩体内,以同源早期岩浆为围岩,成矿作用以接触交代和热液充填为主,形成了高温热液交代型,高温成矿元素组合为主的 Mo(W-Cu)为主的多金属成矿系统。

4.2 成矿物质来源

成矿物质是构成成矿系统和形成矿床的物质基础,斑岩型铜矿及相关的成矿系统大多形成于与洋壳俯冲有关的岛弧和陆源岩浆弧的构造背景,其成岩成矿物质主要来源于上地幔或下地壳^[19-22]。对区内成矿物质的来源前人曾有少量的研究,普朗铜矿中的黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿等硫化物硫同位素组成表明硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围小,在 $-4.8\text{‰} \sim +3.8\text{‰}$ 之间,平均 $+1.47\text{‰}$,硫同位素呈塔式分布(图 9),具单一来源的特征,说明矿石中组成黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿的硫来自深部,主要为上地幔或下地壳的深源岩浆^[23-24]。雪鸡坪斑岩铜矿,矿区中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $-1.8 \sim 0.5\text{‰}$ 之间,平均为 -0.81‰ ,变化范围较窄,具有较高的均一性,显示接近幔源硫特征^[25]。红山铜矿,矿区中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $4.93\text{‰} \sim 5.89\text{‰}$,平均为 5.34‰ ,变化范围窄,具有较高的均一性,说明具有单一的硫源,即岩浆硫^①。格咱岛弧普朗、雪鸡坪、红山、欠虽、地苏噶、亚杂、浪都典型的含矿岩体中 Pb 同位素研究表明, $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}$ 变化于 $17.680 \sim 19.165$ 、 $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204}$ 变化于 $15.453 \sim 15.773$,变化范围不大, $\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{204}$ 变化于 $37.730 \sim 39.654$, Pb 同

① 云南省地质调查院.西南三江南段重大找矿疑难问题研究报告,2009.

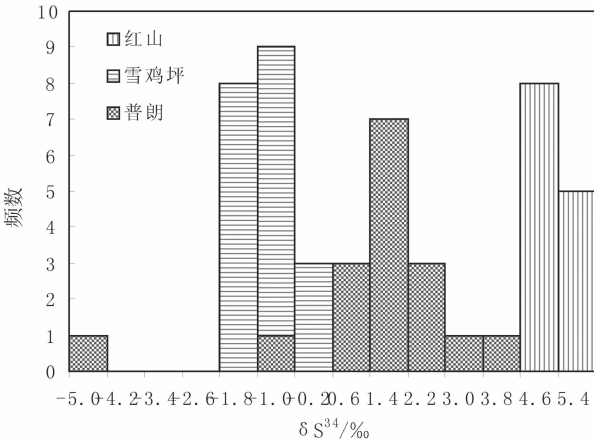
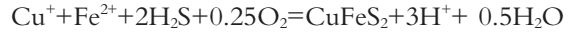


图9 格咱岛弧成矿系统典型斑岩矿床硫同位素直方图
Fig.9 Histogram of main copper-polymetallic deposits in the Geza island arc metallogenic system

位素主要集中于造山带演化线一侧及下地壳范围(图10),指示其物质来源为上地幔或下地壳,并具壳幔混源的特征(另有发文)。

4.3 成矿作用过程

上已述及,格咱岛弧铜多金属矿床的成矿时代主要为印支期和燕山期晚期。在斑岩成矿系统中,成矿作用主要以CuFe硫化物的沉淀得以实现。CuFe硫化物沉淀主要是受温度,S饱和度及pH值的控制,在S饱和的条件下,温度是导致硫化物沉淀的主要因素。含铜硫化物的沉淀反应如下:



这一反应可以用来解释CuFe硫化物矿物的分布。首先,低pH值(酸性)条件下铜一般保持在溶液中,因此,在低pH的条件下流体产生强烈的绢云母蚀变和高级泥化。黄铜矿和其他铜铁硫化矿物的沉淀的温度随钾化(钾长石化和黑云母化)而降低。流体围岩蚀变发生在中-低温条件,主要是大量长石蚀变为绢云母和粘土矿物。第二,随着热液流体中pH值和Fe²⁺含量的增加,导致围岩铁镁矿物发生分解。这种反应发生在高温条件下,火山岩中的角闪石或辉石蚀变为热液型黑云母,这一反应消耗了含矿流体中大量的K⁺和H⁺,而释放出Fe²⁺[27]。因此,更多的Fe²⁺供给到含矿流体中而发生反应,导致黄铜矿的沉淀。这不仅有助于解释为什么富含铁镁的岩石中含有较高的CuFe硫化物及较高的Cu品位,同时也说明了在花岗岩中浸染状CuFe硫化物一般与热液型黑云母蚀变相关。第三,在高温条件下,岩浆热液流体中SO₂的含量比H₂S更高[28-30]。由于岩浆热液的冷却,不成比例的SO₂与水发生反应。



上述反应中形成的H₂S使得CuFe硫化物发生沉淀。Ohmoto和Rey(1979)指出,在700℃条件下,这种反应有利于发生,但流体冷却至400℃时,则有

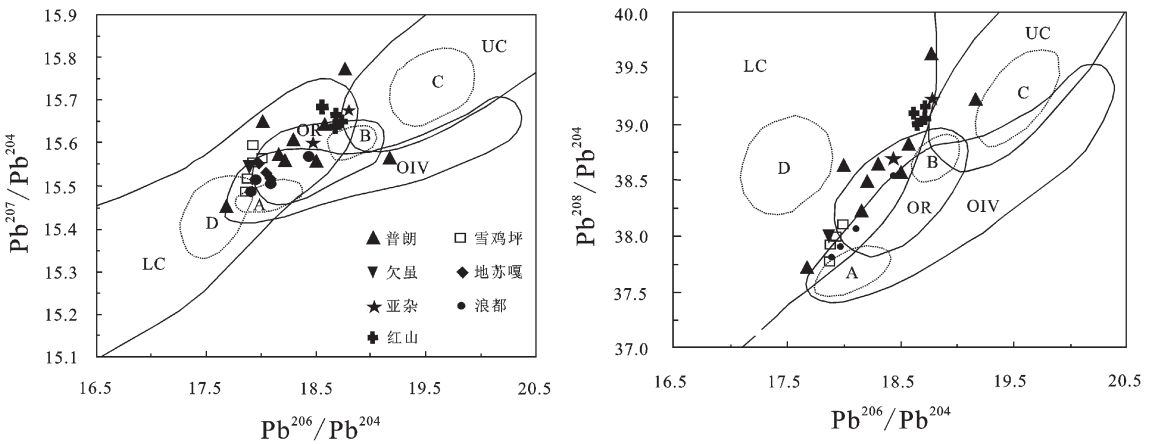


图10 格咱岛弧斑岩矿床铅同位素 Pb²⁰⁷/Pb²⁰⁴-Pb²⁰⁶/Pb²⁰⁴, Pb²⁰⁸/Pb²⁰⁴-Pb²⁰⁶/Pb²⁰⁴ 构造环境判别图解
(据 Zartman and Doe, 1981)
LC—下地壳; UC—上地壳; OIV—洋岛火山岩; OR—造山带; A、B、C、D 分别为各区中样品的相对集中区
Fig.10 Pb isotope Pb²⁰⁷/Pb²⁰⁴-Pb²⁰⁶/Pb²⁰⁴, Pb²⁰⁸/Pb²⁰⁴-Pb²⁰⁶/Pb²⁰⁴ tectonic environment discrimination diagram
(after Zartman and Doe, 1981)
LC—Lower crust; UC—Upper crust; OIV—Ocean island volcanics; OR—Orogenic belt. A, B, C, D show relative concentration areas in various districts

利于 H_2S 的形成^[31]。这一反应也是关于压力的函数,硫化氢在深部高温条件下和浅部低温条件下都可以形成。温度在 $550^{\circ}C \sim 250^{\circ}C$ 的条件下, H_2S 的形成更有利于 CuFe 硫化物发生沉淀富集^[32]。

Au 的物质迁移主要以硫化物络合的形式发生,在 CuFe 硫化物发生沉淀的过程中, S 从流体中被移出,在斑铜矿的固溶体中 Au 发生了沉淀,但在黄铁矿中极少出现,也很少以自然金的形式出现^[33]。格咱岛弧燕山期成矿系统主要发育 Mo 多金属的成矿作用。Mo 的矿化与富集作用主要发生在高温条件下,以氧化钼络合物的形式发生成矿物质的迁移。因此,流体在氯化物含量增加和酸度增加条件下,氢氧化物成分的减少有利于 Mo 成矿元素的沉淀和富集 (MoS_2)。大部分的辉钼矿形成于含矿石英脉中,钼矿化的形成时间要晚于 CuFe 硫化物矿脉,因此高品位 Cu 和 Mo 矿化一般会在空间上共生^[34]。在格咱岛弧 Mo(W)矿床的成矿深度要比铜的成矿深度大,

成矿的温度也更高。

5 成矿系统模式

综上所述,格咱岛弧的铜多金属成矿系统其成矿作用主要发育在印支期和燕山晚期,印支期发育了与中酸性岩浆侵入有关的浅成—超浅成斑岩型 Cu 矿成矿系统;燕山期伴随着同碰撞中酸性岩浆活动形成了斑岩型 Mo(Cu)及热液型 W(Mo)成矿系统。区内火山—沉积建造、斑(玢)岩侵入体、热液蚀变作用、构造作用是成矿系统作用的主要控制因素,斑岩型(矽卡岩型)铜多金属矿床是成矿系统作用的具体表现和产物,成矿系统模式如下图所示(图 11)。

6 结论

(1)格咱岛弧经历了晚三叠世的洋壳俯冲造山作用,侏罗纪—白垩纪的碰撞造山和造山后的伸展作用后,岛弧碰撞造山作用已基本完成。根据岩浆岩

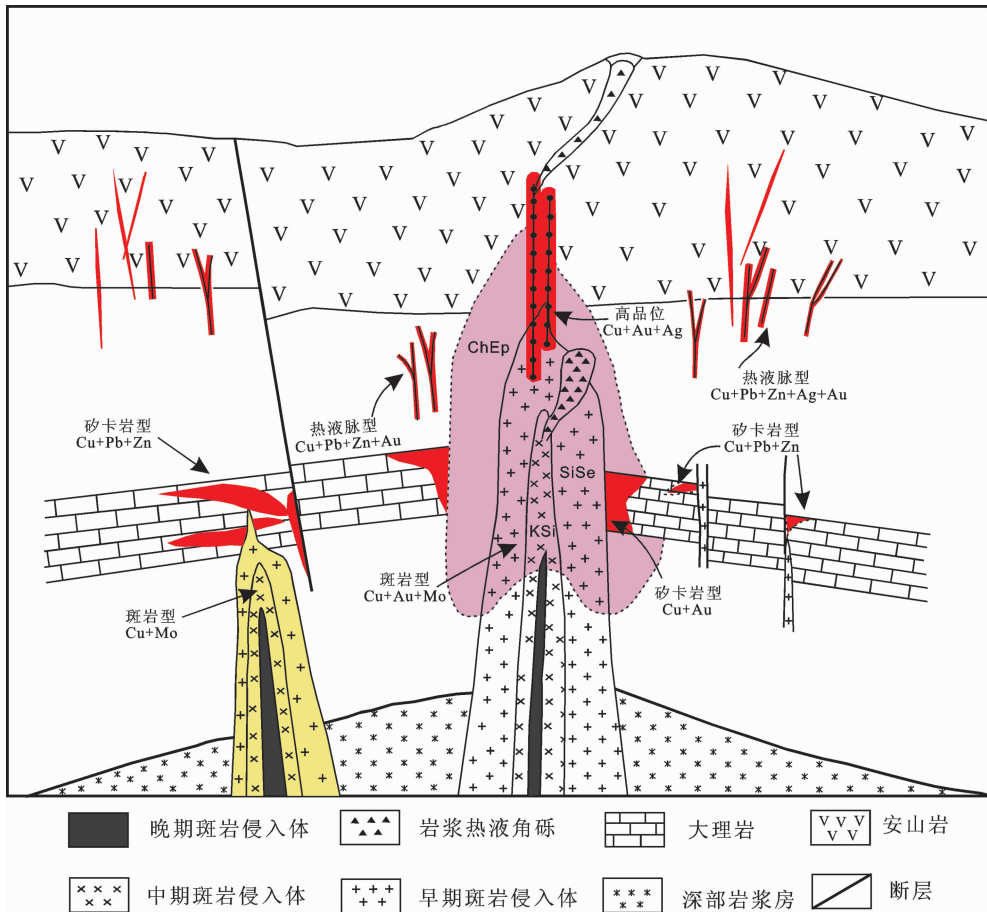


图 11 格咱岛弧铜多金属成矿系统模式(据 Richard H. Sillitoe, 2010 修改)

Fig.11 The model of copper polymetallic metallogenic system in Geza island arc (modified after Richard H. Sillitoe, 2010)

和矿床的时空分布、类型,同位素年代学证据,构造环境及成矿作用,将格咱岛弧成矿系统分为印支期斑岩成矿亚系统和燕山期成矿亚系统。

(2)印支期洋壳俯冲造山作用形成了与安山岩同源的壳幔型中酸性浅成斑(玢)岩,岩浆的侵位形成了斑岩型(夕卡岩型)的铜 Cu(Au)等多金属矿床;燕山晚期发育有大规模的同碰撞型中酸性岩浆侵入作用,并伴有强烈 Mo(W-Cu)多金属成矿事件的发生,其成矿岩体多呈隐伏岩体。

(3)格咱岛弧印支期斑岩型 Cu 矿成矿系统主要形成与地壳浅部,而燕山期 Mo(Cu)多金属矿床的成矿深度一般较大,加之区内成矿物质具深源和壳幔混源的特征,因此深部找矿具有很好的资源潜力,其中燕山期 Mo 多金属矿床是今后找矿工作的一个重要方向。

致谢: 本文是综合多个项目的研究成果,野外工作过程中得到云南省地质调查院黄定柱高级工程师的帮助,在此表示诚挚的感谢。最后感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见和建议。

参考文献(References):

- [1] 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]. 博士学位论文, 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]. Doctorial These, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [2] 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. Mineal Deposits, 2003, 22 (4): 393-400 (in Chinese with English abstract).
- [3] 林清茶, 夏斌, 张玉泉. 云南中甸地区雪鸡坪同碰撞石英闪长玢岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其意义[J]. 地质通报, 2006, 25(2): 133-137.
Lin qintu, Xia bin, Zhang yuquan. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the syn-collisional Xuejiping quartz diorite porphyrite in Zhongdian, Yunnan, China, and its geological implications [J]. Geological Bulletin of China, 25(2): 133-137.
- [4] 曹殿华, 王安建, 黄玉凤, 等. 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[J]. 地质学报, 2009, 83(10): 1430-1435.
Cao Dianhua, Wang Anjian, Huang Yufeng, et al. SHRIMP U-Pb Geochronology and Hf Isotope Composition of Zircons from Xuejiping Porphyry Copper Deposit, Yunnan Province [J]. Acta Geologica sinica, 2009, 83 (10): 1430 - 1435 (in Chinese with English abstract).
- [5] 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).
- [6] 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 Petrology Sinica, 2006, 22(4): 989-1000 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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(北京), 2007.
Du Yangsong, Pang Zhenshan, Wang Gongwen, et al. Metallogenic Regularities and Predictions of Pulang Copper Deposit, Yunan [R]. China University of Geosciences(Beijing), 2007.
- [8] 王守旭, 张兴春, 冷成彪, 等. 滇西北普朗斑岩铜矿锆石 U-Pb 年龄成矿时限及地质意义 [J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2313-2321.
Wang Shouxu, Zhang Xingchun, Leng Chengbiao, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Pulang porphyry copper deposit, northwestern Yunnan, China; The ore-forming time limitation and geolocal significance [J]. Acta Petrology Sinica, 2008, 24(10): 2313-2321 (in Chinese with English abstract).
- [9] 徐兴旺, 蔡新平, 屈文俊, 等. 滇西北红山晚白垩世花岗岩型 Cu-Mo 成矿系统及其大地构造学意义[J]. 地质学报, 2006, 80(9): 1422-1433.
Xu Xingwang, Cai Xiping, Qu Wenjun, et al. Later Cretaceous granitic porphyritic Cu-Mo mineralization system in the Hongshan Area, Northwestern Yunnan and its significances for tectonics [J]. Acta Geologica sinica, 2006, 80 (9): 1422-1433 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李建康, 李文昌, 王登红, 等. 中甸弧燕山晚期成矿事件的 Re-Os 定年及成矿规律研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2415-2422
Li jiankang, Li wenchang, Wang denghong, et al. Re-Os dating for ore-forming event in the late of Yanshan Epoch and Research of Ore-forming Regularity in Zhongdian Arc [J]. Acta Petrologica Sinia, 2007, 23(10): 2415-2422 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李文昌, 尹光侯, 余海军, 等. 滇西北格咱火山-岩浆弧斑岩成矿作用[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2541-2552.
Li Wenchang, Ying Guanghou, Yuhaijun, et al. The porphyry metallogenesis of Geza volcanic magmatic arc in NW Yunnan [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (9): 2541-2552 (in Chinese with English abstract).
- [12] 陈建平, 唐菊兴, 丛源, 等. 藏东玉龙斑岩铜矿地质特征及成矿模型[J]. 地质学报, 2009, 83(13): 1887-1900.
Chen Jianping, Tang Juxing, Cong Yuan, et al. Geological Characteristics and Metallogenic Model in the Yulong Porphyry

- Copper Deposit, East Tibet[J]. *Acta Geologica sinica*, 2009, 83(13): 1887-1900(in Chinese with English abstract).
- [13] 翟裕生, 邓军, 彭润民, 等. 区域成矿研究方法 [M]. 中国地质大学出版社, 2010: 41-212.
- Zhai Yusheng, Deng Jun, Peng Runming, et al. *Metallogenic Systems* [M]. Geological Publishing House. 2010: 1-10 (in Chinese).
- [14] 张兴春, 冷成彪, 杨朝志, 等. 滇西北中甸春都斑岩铜矿含矿斑岩的锆石 SIMS U-Pb 年龄及地质意义 [J]. *矿物学报 (增刊)*, 2009(1), 359-360.
- Zhang Xingchun, Leng Chengbiao, Yang Chaozhi, et al. Zircon SIMS U-Pb and geological implication of ore porphyry in Chundu porphyry copper deposit, Northwest Yunnan [J]. *Acta Mineralogica Sinica (suppl.)*, 2009(1), 359-360.
- [15] 任建波, 徐继峰, 陈建林. 2011. 中甸岛弧成矿斑岩的锆石年代学及其意义 [J]. *岩石学报*, 27(7): 2591-2599.
- Ren J B, Xu J F, Chen J L, et al. 2011. Geochemistry and petrogenesis of Pulang porphyries in Sanjiang region [J]. *Acta Petrological Mineralogical*. 30(4): 581-592(in Chinese with English abstract).
- [16] 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 等. 滇西北中甸松诺含矿斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(1) 124-130.
- Leng Chengbiao, Zang Xingchun, Wang Shouxu, et al. SHRIMP P zircon U-Pb dating of the Songruo ore-hosted porphyry, Zhongdian, Northwest Yunnan, China and its geological implication [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2008, 32(1) 124-130 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李文昌, 尹光侯, 卢映祥, 等. 滇西北格咱火山-岩浆弧斑岩成矿作用 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2541-2552.
- Li WenCang, Ying Guanghou, Yu Yinxiang, et al. The porphyry metallogenesis of Geza volcanic magmatic arc in NW Yunnan [J]. *Acta petrologica Sinica*, 2011. 27 (9): 2541-2552 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李文昌, 尹光侯, 刘学龙, 等. 中甸矿集区普朗-红山铜多金属成矿亚带北段帕纳牛场斑岩体 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及铋矿化 [J]. *地质与勘探* 2010, 46(2): 597-618.
- Li Wenchang, Yin Guanghou, Liu Xuelong, et al. Pulang-Hongshan multiple metal mineralization belt northern section of Panan cattle farm porphyry body $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age and antimony mineralization in Zhongdian ore concentrating area. *Geology and Exploration*, 2010, 46 (2): 597-618 (in Chinese with English abstract).
- [19] 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): 179-205.
- Zhao Wenjin. Deep tectono-magmatic setting for metallogenesis of large porphyry copper deposits [J]. *Geology in China*, 2007, 34(2): 179-205 (in Chinese with English abstract).
- [20] 肖荣阁, 白风军, 原振雷, 等. 东秦岭钼、金多金属矿区域成矿系统与成矿预测 [J]. *现代地质*, 2010, 24(1): 1-10.
- Xiao Rongge, Bai Fengjun, Yuan Zhenlei, et al. *Metallogenic System and Prediction of Mo-Au polymetallic deposits in East Qinling* [J]. *Geoscience*, 2010, 24(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- [21] 陈衍景, 肖文交, 张进江. 成矿系统: 地球动力学的有效探针 [J]. *中国地质*, 2008, 35(6): 1059-1073.
- Chen Yanjing, Xiao Wenjiao, Zhang Jinjiang. Ore-system as a geodynamic probe [J]. *Geology in China*, 2008, 35(5): 1059-1073 (in Chinese with English abstract).
- [22] 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型 [J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 340-351.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, et al. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, temporal distribution and ore deposit types [J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 340-351 (in Chinese with English abstract).
- [23] 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(13): 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(13): 277-288 (in Chinese with English abstract).
- [24] 李文昌, 刘学龙, 曾普胜, 等. 云南普朗斑岩型铜矿成矿岩体特征. *中国地质*, 2011, 38(2): 403-414
- Li Wenchang, Liu Xuelong, Zeng Pushen, et al. The characteristics of metallogenic rocks in Pulang porphyry copper deposit of Yunnan province. *Geology in China*, 2011, 38 (2): 403-414 (in Chinese with English abstract).
- [25] 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. *矿物学报*, 2007, 12: 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. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 12: 414-421 (in Chinese with English abstract).
- [26] Zartman RE, Doe BR. Plumbotectonics -the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 175(1-2): 135-162.
- [27] Brimhall G H, Agee C, and Stoffregen R E. The hydrothermal conversion of hornblende to biotite [J]. *Canadian Mineralogist*, 1985, 23: 369-379.
- [28] Einaudi M T, Hedenquist J W, and Inan E E. Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems-Transitions from porphyry to epithermal environments [J]. *Society of Economic Geologists Special Publication* 10, 2003, 285-313.
- [29] Field C W, Zhang L, Dilles J H, et al. Sulfur and oxygen isotope record in sulfate and sulfide minerals of early, deep, pre-Main Stage porphyry Cu-Mo and late Main Stage base-metal mineral deposits, Butte district, Montana [J]. *Chemical Geology*, 2005, 215: 61-93.
- [30] Chambefort I, Dilles J H, and Kent A J R. Anhydrite-bearing

- andesite and dacite as a source for sulfur in magmatic-hydrothermal mineral deposits[J]. *Geology*, 2008, 36:719-722.
- [31] Ohmoto, Hiroshi, Rye, R. O. Isotopes of sulfur and carbon, in Barnes [J]. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2nd ed.; New York, John Wiley and Sons, 1979, 509-567.
- [32] Hemley J J, Cygan G L, Fein J B, et al. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered systems-I. Iron-copper-zinc-lead sulfide solubility relations[J]. *Economic Geology*, 1992, 87:1-22.
- [33] Kesler S E, Chrysosoulis S L, and Simon G. Gold in porphyry copper deposits: its distribution and fate [J]. *Ore Geology Reviews*, 2002, 21:103-124.
- [34] Rusk B G, Miller B J, and Reed M H. Fluid-inclusion evidence for the formation of Main Stage polymetallic base-metal veins, Butte, Montana, United States, in Spencer, J.E., and Titley, S.R., eds., *Ores and orogenesis: Circum-Pacific tectonics, geologic evolution, and ore deposits* [J]. *Arizona Geological Society Digest*, 2008, 22, p. 573-581.
- [35] Richard H S. Porphyry copper systems [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1):3-41.

The metallogenic system of porphyry-skarn type Cu ,Mo(Au) polymetallic deposits in Geza island arc of Yunnan Province

LIU Xue-long^{1,2}, LI Wen-chang^{1,2}, YIN Guang-ghou²

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

Abstract: Geza island arc belt is one of the important tectonic units in the archipelagic arc-basin system of the Sanjiang Region. It started its evolution at the westward subduction of Ganzi-Litang oceanic crust in Late Triassic, and experienced intracontinental convergence and post-orogenic extensional phase in Yanshanian period. In this region, there were strong magmatic activities and rich mineralization, constituting an important copper polymetallic ore concentration area discovered in recent years. According to temporal and spatial distribution of magmatic rocks and ore deposits, geochronological evidence, tectonic setting and mineralization, the Geza island arc metallogenic system can be divided into Indosinian metallogenic subsystem and Yanshanian metallogenic subsystem. The Indosinian subsystem mainly developed intermediate-acidic crust-mantle magmatism homologous with the andesite and formed porphyry Cu metallogenic system; the Yanshanian subsystem had syn-collision magmatic activities leading to the generation of the porphyry Mo (Cu) and W (Mo) hydrothermal metallogenic system. Studies show that Geza island arc has favorable resource potential in the depth, with Mo polymetallic mineralization of Yanshanian epoch showing better prospect.

Key words: island arc, metallogenic characteristics; metallogenic system; Indosinian epoch; Yanshanian epoch; Geza

About the first author: LIU Xue-long, male, born in 1983, doctor candidate, engages in research on mineral deposit geology; especially in the study of geology and mineral resources of Sanjiang region in Yunnan Province; E-mail: xuelongliu@foxmail.com.