

文章编号:0258-7106(2001)03-0199-09

川西农都柯火山岩型低温热液 Au-Ag 多金属矿床的特征与成因*

曲晓明^{1,2} 张绮玲^{1,2} 侯增谦¹ 许远平³ 李金忠³(1 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037; 2 南京大学内生矿床国家重点实验室,
南京 210093; 3 四川省地勘局 403 地质队,峨嵋山 614200)

提 要 农都柯矿床是在义敦岛弧带中首次发现的火山岩型浅成低温 Au-Ag 多金属矿床。该矿床产于弧后扩张盆地的勉戈组流纹岩中,受韧性剪切带控制。矿床中发育一套典型的低温热液矿物组合,包括辉锑铅矿、辉锑银铅矿、辉锑矿、砷黝铜矿、自然金、黄铁矿、闪锌矿、雌黄、雄黄、登红石(HgO)等。蚀变作用以硅化和绢云母化为主,伴生重晶石化和蒙脱石化。按照现行的火山岩型低温热液金-银矿床的分类原则,该矿床应属于高硫的酸性硫酸盐型。流体包裹体研究表明,主要成矿过程发生在 221~130℃之间;成矿流体的温度与盐度演化趋势暗示着矿床之下存在一隐伏岩浆房。硫、铅同位素显示成矿物质主要来自弧后火山岩,矿床是岩浆热液与大气降水对含矿火山岩(矿源层)联合作用的结果。

关键词 义敦岛弧 火山岩 低温热液 Au-Ag 多金属矿床

中图分类号: P618.51;P618.52

文献标识码: A

过去十多年来,人们在弧后火山岩区相继发现了一些浅成低温热液型贵金属矿床。这些矿床品位较低,但储量巨大,常常达到大型-超大型规模,因此引起了勘探地质学家和矿床学家们的极大重视(侯增谦等,2001)。义敦岛弧带地处三江构造带北段,是三江特提斯构造域的重要组成部分。这里有极其优越的成矿构造环境,在主弧带弧间裂谷中孕育了呷村特大型银多金属块状硫化物矿床。通过研究,笔者在该岛弧弧后扩张盆地的上三叠统勉戈组酸性火山岩区,进一步确定出了一条浅成低温 Au-Ag-Hg 多金属成矿带的存在,并率先在农都柯取得了找矿突破。在一条岛弧带中发育两种裂陷环境,两种不同类型的矿化,这在世界上也是不多见的。农都柯矿床发现的意义在于它不仅为义敦岛弧带乃至整个三江地区开辟了新的找矿方向,而且也大大地丰富了岛弧造山带成矿理论的研究内容。

1 成矿地质背景

义敦岛弧地处“三江”构造带北部,是中生代印

度板块与欧亚板块碰撞挤压形成的主要构造单元。晚三叠世扬子板块沿甘孜—理塘断裂带向西俯冲,在薄的陆壳基底之上发生岛弧带造山作用(侯增谦等,1995;2001),形成了一套以安山岩为主的火山沉积岩带,构成了义敦岛弧的主体。在主弧带形成期间发生过短暂的构造裂陷,伴随着双峰火山作用,形成了以呷村为代表的海底火山喷流型块状硫化物矿床。农都柯浅成低温银金多金属矿化则发生在主弧带形成之后的弧后扩张阶段,构造上产于以双峰火山作用为特点的弧后扩张盆地中。成矿岩系为双峰火山岩系的酸性端员勉戈组流纹岩。这套火山岩成分上富钾,酸性端员特别发育,基性岩仅在勉戈一带局部出露,具有典型的弧后裂谷火山作用特点(胡世华等,1992;侯增谦等,2001)。

2 矿床地质特征

2.1 矿化主岩特征

矿化主岩为一套酸性的火山碎屑岩系(图1),富含凝灰质,属凝灰质流纹岩相。岩石经历过绿片岩

* 本文为国家“九五”科技攻关项目(96-914-03-05)资助的研究成果。
第一作者简介:曲晓明,男,1961年生,副研究员,从事矿床地球化学研究工作。
收稿日期 2000-06-16;改回日期 2001-02-15。张绮玲编辑。

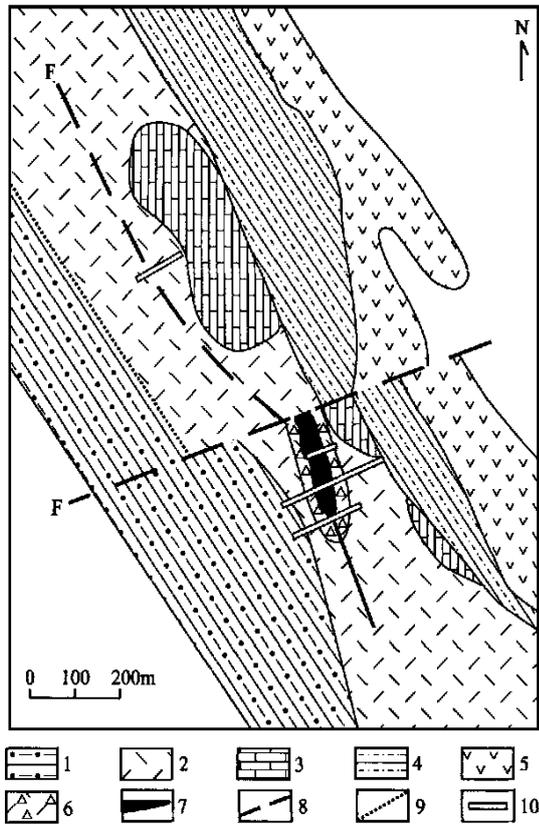


图1 农都柯 Au-Ag 多金属矿区地质略图
(据四川地勘局 403 地质队)

1—上三叠统喇嘛垭组砂砾岩; 2—上三叠统勉戈组流纹岩; 3—上三叠统曲嘎寺组灰岩; 4—上三叠统曲嘎寺组砂板岩; 5—呷村组安山岩; 6—绢英岩化流纹质碎裂岩; 7—金银矿体; 8—推测断层; 9—推测地质界线; 10—探槽

Fig. 1 Diagrammatic geological map of the Nongduke Au-Ag polymetallic ore deposit

1—Sandy conglomerate of Upper Triassic Lamaya Formation; 2—Rhyolite of Upper Triassic Miange Formation; 3—Limestone of Upper Triassic Qugasi Formation; 4—Sandy slate of Upper Triassic Qugasi Formation; 5—Andesite of Gacun Formation; 6—Sericitized rhyolitic cataclastic rock; 7—Au-Ag orebody; 8—Inferred fault; 9—Inferred geological boundary; 10—Trench

相低级区域变质,火山碎屑已普遍发生不同程度的脱玻化和重结晶,有大量的绢云母和石英生成。石英呈他形粒状,具波状消光,粒间常呈齿状接触。绢云母呈微细鳞片状集合体均匀分布于石英之间,构成岩石的鳞片粒状变晶结构。作为火山产物的残余,原岩碎屑常呈火焰状、云杂状、树枝状等不规则体残留于重结晶的变晶石英之间,构成变余火山碎

屑结构。岩石中偶尔可见石英和斜长石斑晶,粒径一般在 0.1~0.5 mm 之间。石英斑晶浑圆粒状,常受基质熔蚀,具明显的波状消光;斜长石呈板状外形,普遍绢云母化。

化学分析表明这套火山岩以高钾富硅为特点, $w(\text{K}_2\text{O}) = 3.48\% \sim 5.77\%$, $w(\text{SiO}_2) = 74.29\% \sim 79.49\%$,在火山岩硅-碱图上位于高钾亚碱性岩区^①。

2.2 控矿构造

矿化受近南北向的剪切破碎带控制,破碎带宽约 40 m,倾向东,倾角约 50~60°(图 2)。该破碎带的最大特点是至少经历了 2 个韧-脆性构造旋回,以原岩物质和硫化物矿石均发生强烈的韧性变形为标志。作为原岩构造特征,绢云母沿剪切滑动面优先发育,定向排列;局部石英重结晶明显时形成绢云母石英片岩。在主剪切面附近,原岩物质全部结晶成由微细绢云母鳞片构成的千糜岩,厚 20~50 cm。晚期构造活动使岩石发生构造破裂,形成碎裂岩,为成矿流体的运移和沉淀提供通道和场所。硫化物矿石本身呈透镜体定向排列,透镜体内部的金属硫化物呈条纹条带状沿片理定向分布。这说明矿床在形成之后又经历了一次强烈的韧性剪切作用。以雌黄、雄黄为标志的矿脉穿切硫化物透镜体,指示着第二构造旋回的完成。

2.3 矿化及围岩蚀变

农都柯矿区银、金多金属矿化严格受剪切破碎带控制,矿体主要产于剪切面上盘,由蚀变的流纹质碎裂岩组成。主裂面附近,矿石变为糜棱岩或千糜岩。根据 0 号探槽部分样品的分析结果(表 1),银的最高品位为 333×10^{-9} , Au 的最高品位为 1.99×10^{-9} 。其他成矿元素 As、Sb、Hg、Zn 等也有些达到或接近工业品位。另据四川地勘局 403 地质队 4 号探槽刻槽样品分析结果,银最高品位大于 1600×10^{-9} ,金最高为 $w_{\text{Au}} = 4.27 \times 10^{-9}$ 。矿床中银金储量比例约为 10:1。从矿化组合上看,该矿床为 Ag-Au-As-Sb-Hg 多金属矿床。与热液蚀变相对应,本矿区成矿作用分变质和热液 2 个成矿期,4 个矿化阶段:

变质成矿期,即为第 1 矿化阶段。

①含金球状黄铁矿阶段,矿化由含金的黄铁矿

① 曲晓明. 2000. 义敦岛弧带构造演化与多金属矿成矿规律研究. 科研报告, 217~229.

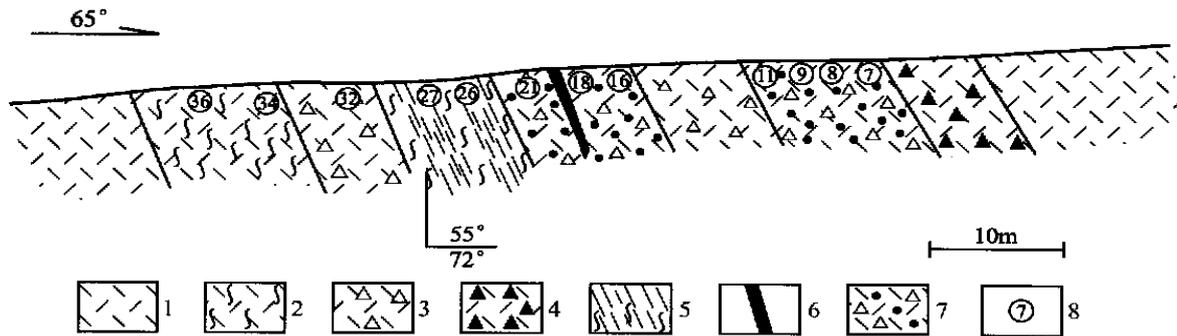


图 2 川西农都柯 Au-Ag 多金属矿床(0 线)剖面图

1—变凝灰质流纹岩; 2—蚀变千枚状变凝灰质流纹岩; 3—蚀变流纹岩质碎裂岩; 4—碎裂状蚀变流纹岩; 5—千糜状绢云母岩;
6—金矿体; 7—银矿体; 8—取样位置及编号

Fig. 2 Geological section (Line 0) of the Nongduke Au-Ag poly metallic ore deposit in western Sichuan Province

1—Metatuffaceous rhyolite; 2—Altered phyllitic tuffaceous rhyolite; 3—Altered rhyolitic cataclastic rock; 4—Cataclastic altered rhyolite;
5—Phyllitic sericite rock; 6—Au orebody; 7—Ag orebody; 8—Location and number of samples

表 1 川西农都柯 Au-Ag 多金属矿床成矿元素分析结果 ($\times 10^{-6}$)

Table 1 Ore-forming element analyses ($\times 10^{-6}$) of the Nongduke deposit

元素	N-7	N-8	N-9	N-11	N-16	N-18	N-26	N-27	N-32	N-34	N-36
Cu	0.11*	406	0.32*	0.25*	0.12*	0.13	155	50.2	216	11.6	119
Pb	2674	81.8	3290	3047	1208	3010	40.0	23.1	452	37.9	37.2
Zn	0.35*	270	1.11*	1.24*	0.39*	0.51*	152	102	323	94.2	102
Au	0.38	0.40	0.15	0.17	0.07	1.99	0.12	0.09	0.17	0.06	0.18
Ag	331	8.4	333	161	134	122	2.2	1.4	54.4	1.6	1.9
As	432	551	0.13*	0.11*	622	752	0.39*	862	264	0.13*	821
Sb	0.49*	1.58*	1.30*	0.62*	0.59*	0.32*	280	200	1400	280	240
Hg	374	27.0	651	655	211	290	0.16*	883	44.0	468	208

注:带*者为%。分析单位:原地矿部湖北省岩矿测试中心。分析方法:ICP-AES。

球粒组成,产于火山岩的特定层位,球粒大小一般在 0.01 ~ 0.1 mm 之间,常见多个球粒聚集包含于石英颗粒内,少数零星独立分布。包裹这些球粒的石英均呈他形粒状,彼此呈齿状边紧密镶嵌,是绿片岩相变质期间形成的变晶石英。黄铁矿球粒显示出完好的圈层构造,最多时达 6 层。电子探针分析表明这些球粒常常是含金的, $w_{Au} = 0.12\% \sim 0.67\%$, 平均为 0.25%(表 2)。这说明本区火山岩在绿片岩相变质期间已发生过金的初步富集。

热液成矿期,包括第 2、第 3 和第 4 矿化阶段。

② 早期硅化-绢云母-黄铁矿阶段,伴随着早期热液蚀变,有少量黄铁矿析出。这些黄铁矿颗粒较粗,粒径一般在 0.1 ~ 0.3 mm 之间,呈半自形粒状,常具裂纹,与粗粒硅化石英相伴,含矿性差。

③ 中期硅化-绢云母-金银多金属硫化物阶段,本阶段热液活动以出现自然金和多种含金、含银矿

物为特征,发育一套典型的低温热液矿物组合,是矿区的主要成矿阶段。矿石矿物除自然金外,还有辉锑铅矿、辉锑银铅矿、辉锑矿、砷黝铜矿、闪锌矿、黄铁矿等。自然金呈粒状,粒径 0.01 ~ 0.025 mm,与辉锑矿一起充填于石英晶隙中。电子探针分析表明金成色很高, $w_{Au} = 89.92\%$ (表 2)。

砷黝铜矿呈他形粒状,颗粒粗大,常与辉锑铅矿连生,单独或与闪锌矿一起分布于石英间隙中。该矿物含银高, $w_{Ag} = 2.77\% \sim 5.36\%$, 平均值为 3.69%;含金较低, $w_{Au} = 0.12\% \sim 2.22\%$, 平均值为 0.25%。辉锑铅矿,他形粒状,颗粒粗大,常与砷黝铜矿等连生,构成矿石的斑点状构造,可以交代闪锌矿,使后者呈格状残留。该矿物普遍含银, $w_{Ag} = 0.65\% \sim 1.54\%$, 平均值为 0.89%, 是银的主要载体矿物。辉锑银铅矿, $w_{Ag} = 11.80\% \sim 12.71\%$, 银平均值为 12.26%。辉锑矿,常与绢云母共生,并包含

表2 农都柯 Au-Ag 多金属矿床矿石矿物电子探针分析结果 (%)

Table 2 Electronic microprobe analyses (%) of ore minerals from the Nongduke Au-Ag polymetallic deposit

矿石矿物	自然金 (1)	辉锑矿 (11)	砷黝铜 矿(11)	辉锑铅 矿(9)	辉锑银 铅矿(2)	黄铁矿(自形 一半自形) (5)	黄铁矿(球 粒)(11)	闪锌矿 (3)	雄黄 (6)	雌黄 (3)
S	0.00	26.67	27.66	22.64	24.14	53.03	52.020	33.05	30.78	44.66
Fe	0.06	0.01	1.01	0.06	0.11	43.44	43.01	0.10	0.07	0.02
Co	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.00	0.02	0.05	0.07	0.02
Ni	0.00	0.09	0.08	0.23	0.21	0.06	0.09	0.07	0.07	0.02
Cu	0.00	0.12	38.53	0.60	0.68	0.06	0.14	0.00	0.15	0.17
Zn	0.10	0.16	6.17	0.38	0.42	0.13	0.23	65.78	0.16	0.04
As	1.14	2.40	11.71	0.798	3.62	2.55	2.44	0.58	67.76	53.19
Sb	0.01	68.83	9.72	35.84	36.35	0.13	0.67	0.09	0.56	1.48
Se	0.02	0.09	0.17	0.11	0.18	0.28	0.31	0.03	0.00	0.00
Te	0.00	1.21	0.17	0.77	0.69	0.11	0.24	0.04	0.10	0.01
Au	89.92	0.16	0.25	0.08	0.00	0.10	0.25	0.03	0.14	0.18
Ag	8.82	0.09	3.69	0.89	12.26	0.07	0.16	0.00	0.13	0.17
Pb	0.05	0.04	0.06	30.15	21.52	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00
Bi	0.00	0.09	0.35	0.04	0.04	0.03	0.13	0.56	0.04	0.03
合计	100.02	100.00	100.01	99.96	100.00	100.00	100.00	99.71	100.01	100.00

分析单位:中国地质大学(北京)电子探针室;括号中数字为分析点数。

熔蚀绢云母,金含量 $w_{Au} = 0.10\% \sim 0.41\%$,平均值为 0.16% ,是矿床中金的主要载体。

④晚期硅化-重晶石-砷锑汞矿化阶段,本阶段矿化主要呈脉状充填晚期张性裂隙,除了脉石矿物石英和重晶石外,金属矿物以一套反映低温热液生成条件的 As、Sb、Hg 矿物为特征,包括雌黄、雄黄、辉锑矿、登红石。需特别注意的是,登红石是极其罕见的低温热液或热泉条件下的指示性矿物,成分为 $w(HgO) = 95\%$ 左右。

农都柯矿床围岩蚀变很强烈,以硅化为主,还有绢云母化、蒙脱石化及重晶石化。不同蚀变类型在矿化带两侧显示对称分带,外带以绢云母化和蒙脱石化为主,局部出现轻微的硅化,矿化带内则以硅化和绢云母化为主,伴随重晶石化。根据蚀变矿物的形态特征、受后期构造的改造情况及脉体之间的穿切关系,这些热液蚀变可分为4种:

蒙脱石化 分布在矿化带外侧,呈面状分布,主要表现为蒙脱石呈集合体交代斜长石斑晶,常保留斜长石的板状外形,是斜长石的一种高级泥化产物。

早期硅化-绢云母化 在矿化带内局部发育,硅化石英呈粗大的半自形柱粒状集合体充填裂隙。由于流体成分比较单一,本期蚀变几乎全由石英组成,在其晶隙中有零星的绢云母。这些硅化石英彼此紧密镶嵌,构成致密的硅质体。在后来的构造活动中它们破碎后常被磨圆成眼球状,形成硅质核,使矿石呈疙瘩状构造。

中期硅化-绢云母化 仍以石英为主,但伴有较多的绢云母和各种硫化物。石英颗粒细小,常与闪锌矿、辉锑铅矿一起充填裂隙。

晚期硅化-重晶石化 沿晚期张性裂隙发育,石英呈柱状沿裂隙壁垂直生长构成梳状构造。重晶石呈他形,常充填在裂隙中心梳状石英之间的空隙中,部分呈细脉状分布。

3 矿床地球化学

3.1 流体包裹体

矿石中流体包裹体比较发育,大多数见于石英中,少量见于重晶石中。

早期硅化石英(阶段2),其中的包裹体以次生为主,原生包裹体较少,呈星散状分布,多为气液两相,气液比较高,一般在 $20\% \sim 40\%$ 之间,有时可见到含 CO_2 三相包裹体。

主要成矿阶段形成的细粒硅化石英(阶段3),其中的流体包裹体分布很不均匀,往往在少数颗粒内成群密集分布,个体较小($< 10 \mu m$),气液比在 $15\% \sim 30\%$ 之间,可见单液相包裹体。

在晚期的梳状石英和重晶石(阶段4)中,包裹体个体较大(达 $20 \mu m$),但数量较少,由气液两相和单液相两种类型组成,两相包裹体的气液比一般不大于 20% ,在石英和重晶石中零星分布。

按不同矿化阶段对原生流体包裹体进行显微测

温(表 3),结果表明不同矿化阶段成矿流体的温度呈规律性降低(图 3)。成矿作用早期流体温度较高,从 345 ~ 224 °C,跨越了较大的温度间隔,反映出早期的流体活动是一个比较缓慢的过程。中期主要成矿阶段,热液活动经历的温度区间窄,221 ~ 130 °C,说明成矿物质的沉淀过程进行得很快。热液活动晚期的矿化作用也是在较窄的温度间隔内(138 ~ 101 °C),反映出该矿床成矿流体系统演化到中-晚期阶段已经离地表很近,并处于相对开放的环境中,因而促成了成矿物质的快速沉淀。从构造形迹看,早期硅化石英呈磨圆的结核状包卷于中-晚期蚀变产物之中,说明前者形成于较深的构造层次。

流体包裹体类型单一,气液比变化较小,由此可以排除沸腾作为矿质沉淀机理的可能性。而在与盐

度-均一温度相当的氯化物含量-流体热量图上(图 4),清楚地显示出流体混合对成矿物质沉淀的控制作用(McEwan et al., 1996)。在这里发生混合的两个端员,一个是沿断裂带下渗的大气水;另一个则是来自深部的沿断裂带上升的热流体。不同矿化阶段从早到晚随着流体温度的降低,流体盐度呈规律性下降。早期石英-黄铁矿阶段成矿流体温度较高,盐度也较高, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) = 4.9\% \sim 10.6\%$;在多金属硫化物主要沉淀阶段($t_h = 221 \sim 130\text{ }^\circ\text{C}$),盐度明显下降[$w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) = 2.0\% \sim 7.85\%$];到矿化晚期 As、Sb、Hg 矿物沉淀阶段,成矿流体的盐度已经很低,与大气水接近。这一演化趋势可以从两个方面来解释,其一,伴随着断裂构造的多期次活动,成矿流体系统离地表越来越远,大气降水的混入量增多;其

表 3 农都柯矿区流体包裹体显微测温结果

Table 3 Microthermetric results of fluid inclusions in the Nongduke deposit

样品号	长轴长/ μm	矿化阶段	$t_h/^\circ\text{C}$	$t_m/^\circ\text{C}$	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\text{wt}\%$	$\rho(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
CN20	4 ~ 10	3	152 ~ 178	- 1.8 ~ - 2.2	3.0 ~ 4.6	0.91 ~ 0.95
CN20	3 ~ 7	4	101 ~ 114	- 0.7	1.2	0.96
CNV - 03	3 ~ 10	3	142 ~ 189	- 4.6 ~ - 4.9	7.3 ~ 7.7	0.95
CNII-11	7 ~ 10	2	241 ~ 343	- 6.6 ~ - 6.9	10.0 ~ 10.6	0.89 ~ 0.91
CNII-11	3 ~ 20	3	140 ~ 345	- 1.2 ~ - 7.1	2.0 ~ 10.6	0.78 ~ 0.95
CNII-11	3 ~ 9	4	114 ~ 138	- 0.5 ~ 0.8	0.8 ~ 1.4	0.95
CN - 15	4 ~ 18	3	130 ~ 210	- 2.4 ~ - 3.9	4.0 ~ 6.2	0.90 ~ 0.96
CN-15	5 ~ 7	2	256 ~ 338	- 2.9 ~ 3.0	4.8 ~ 4.9	0.80
CNII - 21	10	2	285			
CNII-21	6 ~ 11	3	151 ~ 202	- 2.6 ~ - 3.3	4.3 ~ 5.4	0.90 ~ 0.94

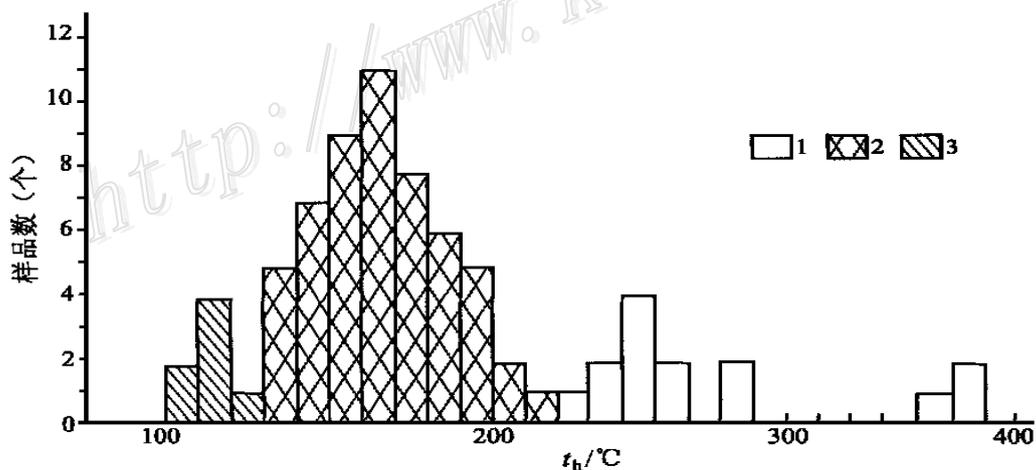


图 3 农都柯矿区流体包裹体均一温度直方图

1—第 2 矿化阶段; 2—第 3 矿化阶段; 3—第 4 矿化阶段

Fig. 3 Histogram showing homogenization temperature of fluid inclusions in the Nongduke deposit

1—2nd mineralization stage; 2—3rd mineralization stage; 3—4th mineralization stage

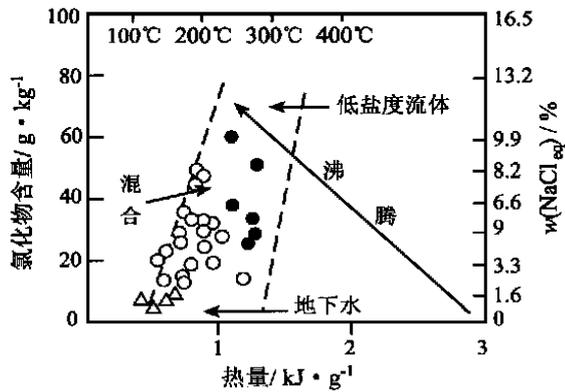


图4 农都柯矿区流体包裹体氯化物含量-热量-盐度图
(据 McEwan 等,1996)

●—第2矿化阶段;○—第3(主要)矿化阶段;△—第4矿化阶段

Fig. 4 Chloride content-heat-salinity diagram of fluid inclusions in the Nongduke deposit

●—2nd mineralization stage; ○—3rd mineralization stage; △—4th mineralization stage

二, Candela (1989) 模拟计算表明, 在大约 2×10^8 Pa 的较高压力下, 从深部岩浆房中批式分凝出来的岩浆热液的盐度是逐渐降低的。若如此, 意味着本矿床的成矿流体系统受一个深部岩浆房驱动。在这样的深度条件下(约 5 ~ 7 km), 除了从岩浆房分凝出的岩浆流体外, 自然也会有一定数量的下渗大气水加入进来。

3.2 硫、铅同位素

农都柯矿区的硫化物矿石、硫化物以及流纹岩的硫、铅同位素分析结果列于表4。流纹岩全岩样品由于含S太低, 硫同位素没有检测出来。但从矿石和硫化物的分析结果看, 该矿区硫同位素富集轻硫, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 在 -10.0% ~ -14.7% 之间, 与火山岩淋滤所产生的硫同位素特征一致。Claypool 等(1980) 研究指出, 由大气水对火山岩系淋滤产生的成矿流体总是显示出轻硫特征, $\delta^{34}\text{S}$ 在 -10% 左右。海水硫酸盐还原产生的是重硫, $\delta^{34}\text{S}$ 在 $+10\%$ ~ $+25\%$ 之间。由此说明该矿床的成矿过程是在陆上环境中进行的, 除了来自深部的岩浆热液外, 上部接受的是大气降水。

铅同位素结果显示该矿床形成于富含放射铅的上地壳环境。黄铁矿和方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值与流纹岩的平均值(表4) 具有相同的组成值域, 显示出它们的同源性。在铅构造模式图上(图5), 它们都位于上地壳与造山带之间, 尤其是矿石铅表现出与造山带更密切的关系。

这种特点可能指示着挤压造山对成矿起重要的作用, 说明由成岩到成矿, 本区经历了由扩张到挤压的转折, 这与控矿构造所展现的强烈剪切作用是一致的。

4 矿床成因讨论

4.1 矿床的类型

产于火山岩中的浅成低温贵金属和碱金属矿床一般分为两大类, 一类为低硫的冰长石-绢云母型, 它们形成于近中性的氯化物热液(海水为主) 对流系统(Henley et al., 1983; White et al., 1990); 另一类为高硫的酸性硫酸盐型, 形成于酸性($\text{pH} < 2$)、高氧、富硫酸盐的岩浆热液系统(Heald et al., 1987; White et al., 1990)。由于流体系统上的本质差别以及成矿物理化学条件的不同, 两种矿化类型各发育有特征的矿化蚀变组合。其中高硫的硫酸盐型矿化以出现砷黝铜矿和明矾石+蒙脱石标志性矿物为特征; 低硫的冰长石绢云母型矿化以含有冰长石为标志。矿床学研究表明, 农都柯矿区发育一套典型的低温矿物组合, 砷黝铜矿是该矿床中的主要矿石矿物, 蚀变矿物以发育蒙脱石+重晶石为特征, 缺少冰长石。由此不难看出, 该矿床应属高硫的酸性硫酸盐型。至于矿床中缘何缺少明矾石, 可能与该矿床形成时 f_{O_2} 较低有关(Lattanzi, 1999)。

4.2 与其他浅成低温贵金属矿床对比

随着过去十几年来大量火山岩型浅成低温贵金属矿床的相继发现和人们研究的不断深入, 这类矿床的一些共同特点逐步为人们所认识。与世界其他地区的一些火山岩低温热液贵金属矿床相比, 农都柯矿区具备该类矿床的一些基本特征, 同时也表现出一些独特之处。

成矿温度低是浅成低温贵金属矿床的首要标志。农都柯矿区早期热液活动从 345°C 开始, 延续到 224°C 结束; 主要矿化阶段则发生在 $221 \sim 130^\circ\text{C}$ 之间, 高峰集中在 $160 \sim 170^\circ\text{C}$ 之间, 与其他浅成低温贵金属矿床相比, 成矿温度明显偏低。近年来发现的一些大型-特大型火山岩低温热液贵金属矿床成矿温度大多数在 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 之间(Simon et al., 1999; Lattanzi, 1999; Thournout et al., 1996)。内华达州超大型 Round 山金矿床(金储量达 300 t) 成矿温度已经偏低($150 \sim 275^\circ\text{C}$) (Sander et al., 1990), 但也比农都柯矿区高, 这一方面说明农都柯矿床形成深度

表 4 农都柯矿区火山岩和硫化物硫、铅同位素分析结果

Table 4 S, Pb isotope results of ore and volcanics in Nongduke deposit

样品编号	样品名称	$\delta^{34}\text{S}/\%$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差 2σ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差 2σ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	误差 2σ	备注
CNQ-06	流纹岩	—	18.352	± 1	15.724	± 1	38.576	± 4	含 S 太低
CNQ-07	流纹岩	—	18.611	± 1	15.694	± 1	39.011	± 2	含 S 太低
CNII-07	黄铁矿	-10.0	18.482	± 1	15.643	± 1	38.728	± 4	转化为 BaSO_4
CNII-11	硫化物矿石	-10.4	18.456	± 3	15.652	± 2	38.721	± 6	转化为 BaSO_4
N-35	方铅矿	-10.2	17.119	± 4	15.351	± 1	37.495	± 1	
CN-27	雌黄	-14.7							
CN-28	雄黄	-13.7							

分析单位：国土资源部矿产资源研究所同位素室。硫同位素分析精度为 $\pm 0.2\%$ ；—未检出。

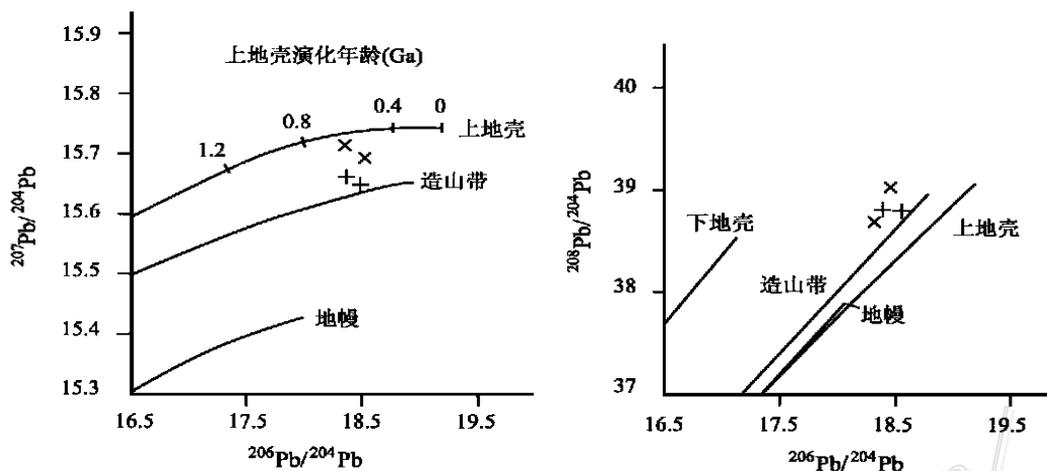


图 5 农都柯矿区流纹岩和硫化物铅同位素构造模式 (据 Doe 和 Zartmann, 1979)

× —流纹岩；+ —硫化物

Fig. 5 Pb isotope diagram of rhyolite and sulfides in the Nongduke deposit

× — Rhyolites; + — Sulfides

更浅,另一方面也可能意味着隐伏岩浆房侵位深度较大。

孕育了浅成低温贵金属矿床的酸性火山岩大多数形成于弧后扩张环境,具双峰成分特点(Simon et al., 1999),这一点农都柯矿床也不例外。但在构造演化上农都柯矿床具有独特之处,该矿床在上三叠统勉戈组流纹质凝灰岩中明显受压扭性构造控制,从蚀变带到矿体均显示出强烈的韧性剪切形迹,从勉戈组流纹岩喷发到农都柯矿床形成,区域应力体制发生了从扩张到挤压的重要转折。另外,从现有资料看,该类矿床多数发育在火山机构的环状或放射状裂隙系统中,与火山作用本身具有更直接的关系。但农都柯矿床的成矿作用与火山喷发后的隐伏岩浆活动关系更密切,与美国科罗拉多州的 Rosita 山银多金属矿床更接近(McEwan et al., 1996)。

4.3 可能的成因模型

农都柯矿床受强烈挤压的剪切破碎带控制,而含矿主岩勉戈组流纹岩形成于弧后扩张环境,说明成岩作用和成矿作用发生于两种截然不同的构造体制下。成矿流体的盐度变化暗示着矿床之下(5~7 km)存在隐伏岩浆房。矿石的硫同位素组成显示岩浆来源特点,铅同位素组成表明成矿与造山带岩浆作用关系更为密切,由此不难得出该矿床的形成包括先期含矿建造和后期岩浆热液改造富集两个阶段。

义敦岛弧演化晚期,由于俯冲板片的断离拆沉,造成弧后区陆壳横向拉张,在扩张盆地中发生双峰火山作用,形成以勉戈组火山岩为代表的含矿建造(图 6a)。该火山岩系 Rb-Sr 全岩等时线年龄为(213 ± 1) Ma(胡世华等, 1992),代表了弧后盆地形成年龄。岛弧形成之后随即转入弧-陆碰撞造山阶段,此时的重要标志是一套 200 Ma 的碰撞花岗岩的产出。

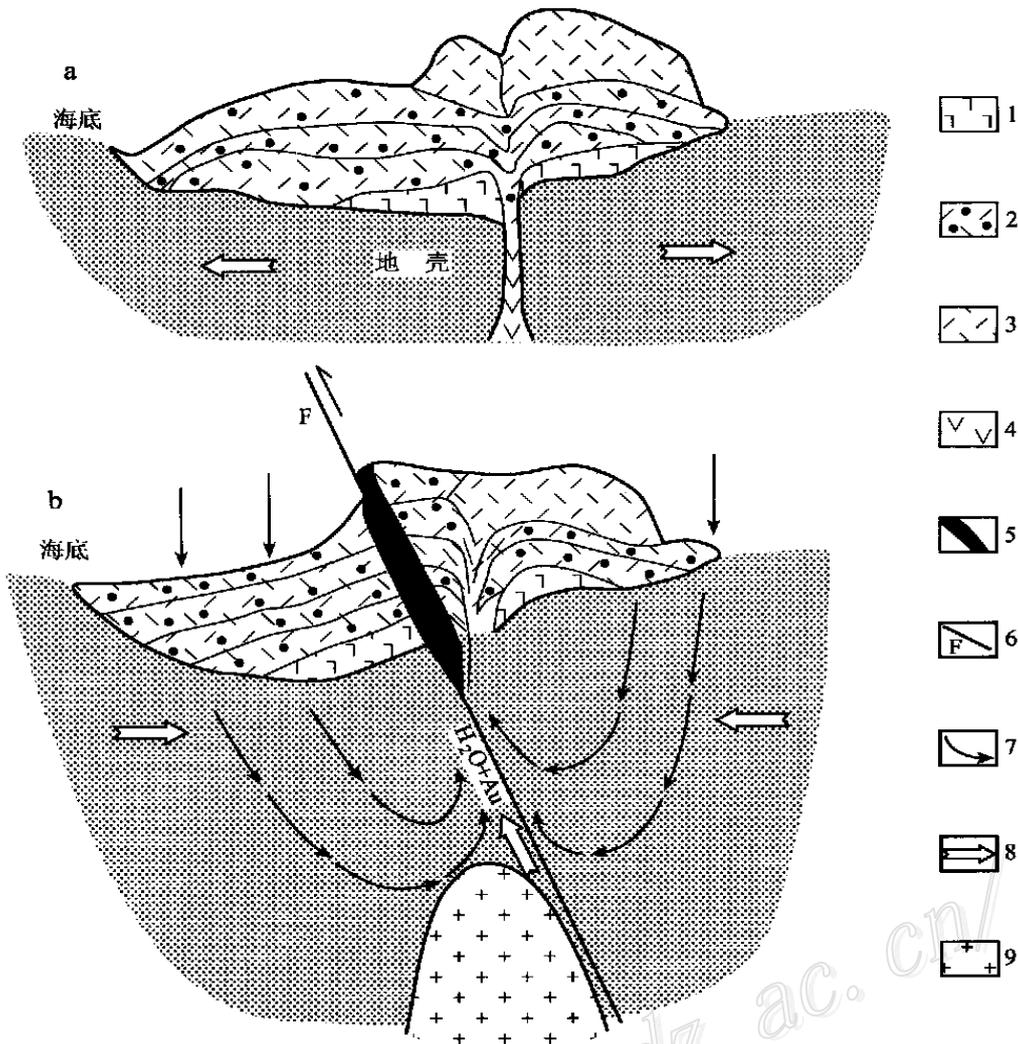


图6 农都柯火山岩低温热液银多金属矿床成矿模式

1—钾玄岩;2—凝灰质流纹岩;3—流纹熔岩;4—火山通道;5—矿体;6—剪切破碎带;7—流体循环方向;8—盆地应力方向;9—隐伏花岗岩

Fig. 6 Genetic model of volcanic epithermal Ag-poly metallic deposit in Nongduke

1—Shoshonite; 2—Tuffaceous rhyolite; 3—Rhyolitic lava; 4—Volcanic channel; 5—Orebody; 6—Shear fault; 7—Fluid circulation path; 8—Basinal stress direction; 9—Buried granite

在此背景下,在勉戈组火山岩分布区由碰撞造山诱发的花岗岩完全有可能沿构造软弱带上升侵位,形成隐伏岩浆房(图6b)。这种岩浆房不仅能分凝出一部分含矿热液直接参与成矿,更重要的是岩浆热源为下渗大气水的对流循环提供驱动力,使矿源层中的成矿元素持续不断地向剪切带中汇聚,最后导致农都柯矿床的形成。

5 结论

(1) 农都柯 Au-Ag 多金属矿床形成于义敦岛弧演化晚期的弧后扩张盆地中,成因上与具有双峰特

点的酸性火山岩(勉戈组流纹岩)有关。

(2) 矿床的形成严格受韧性剪切带控制,从勉戈组含矿火山岩系喷发到成矿,区域应力体制经历了由伸展到挤压的重要转折。

(3) 矿床中发育一套典型的低温热液矿物组合,包括辉锑矿、辉锑铅矿、辉锑银铅矿、砷黝铜矿、自然金、黄铁矿、闪锌矿、雌黄、雄黄及登红石等。蚀变作用以硅化和绢云母化为主,伴有重晶石化和蒙脱石化。矿床属高硫的酸性硫酸盐型火山岩低温热液金多金属矿床。矿化元素除 Au、Ag 外,还伴随着 As、Sb、Hg 诸元素的高度富集,故该矿床应为 Au-Ag-As-Sb-Hg 矿化组合。

(4) 流体包裹体研究表明,矿床之下存在一隐伏岩浆房,岩浆热液为大气降水循环提供驱动力,维持了对矿源层成矿元素的持续萃取;同时直接参与成矿,是矿床形成的关键因素。

参考文献

- 侯增谦, 侯立纬, 叶庆同, 等. 1995. 三江地区义敦岛弧构造-岩浆演化与火山成因块状硫化物矿床[M]. 北京: 地震出版社. 4~96.
- 侯增谦, 曲晓明, 徐明基, 等. 2001. 四川呷村 VHMS 矿床: 从野外观察到成矿模型[J]. 矿床地质, 20(1): 44~56.
- 胡世华, 罗再文, 曾宜尹, 等. 1992. 川西义敦岛弧火山—沉积作用[M]. 北京: 地质出版社. 142.
- Candela P J A. 1989. Magmatic ore-forming fluids: thermodynamic and mass transfer calculations of metal concentrations[A]. In: Whitney J A, Nadrett A J (eds). Ore deposit associated with magmas[C]. Rev Econ. Geol., 4: 203~221.
- Claypool G E, Holser W J, Kaplan I R, et al. 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfates and their mutual interpretation[J]. Chemical Geology, 28: 199~260.
- Heald P, Foley N K, Hayba D O. 1987. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericite types[J]. Econ. Geol., 82: 1~26.
- Henley R W, Ellis A T. 1983. Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review[J]. Earth Science Reviews, 19: 1~50.
- Lattanzi P. 1999. Epithermal precious metal deposits of Italy—an overview[J]. Mineralium Deposita, 34: 630~638.
- McEwan C J A, Fallick A E, Rice C M. 1996. The Rosita hills epithermal Ag-base metal deposits. Colorado, USA[J]. Mineral Deposita, 31: 41~51.
- Sander M V, Einaudi M T. 1990. Epithermal deposition of gold during transition from propylitic to potassic alteration at Round Mountain, Nevada[J]. Econ. Geol., 85: 285~311.
- Simon G, Kesler S E, Russell N, et al. 1999. Epithermal gold mineralization in an old volcanic arc: Jacinto deposit, Camagüey district, Cuba[J]. Econ. Geol., 94: 487~506.
- Thourouot F V, Salemin J, Valenguela G, et al. 1996. Portvelo: a volcanic-hosted epithermal vein-system in Ecuador, South America[J]. Mineral Deposita, 31: 269~276.
- White N C, Hedenquist J W. 1990. Epithermal environments and styles of mineralization: variations and their causes, and guidelines for exploration[J]. J Geochemical Exploration, 36: 445~474.

Characteristics and Origin of the Nongduke Volcanic Epithermal Au-Ag Polymetallic Deposit in Western Sichuan Province

Qu Xiaoming^{1,2}, Zhang Qiling^{1,2}, Hou Zengqian¹, Xu Yuanping³, Li Jinzhong³

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037; 2 State Key Laboratory of Endogenetic Deposit, Nanjing University, Nanjing 210093; 3 No.403 Geological Brigade of Sichuan Bureau of Geology and Exploration, Emeishan 614200)

Key words: Yidun arc, volcanics, epithermal solution, Au-Ag polymetallic deposit

Abstract

The Nongduke deposit is the first volcanic epithermal Au-Ag polymetallic deposit found in the Yidun arc zone. The deposit occurs in the rhyolite area of Miange Formation within the back-arc spreading basin and is controlled by a shearing belt. There develops a typical epithermal mineral association in the deposit, which consists of zinckenite, diaphorite, antimonite, tennantite, native gold, pyrite, sphalerite, orpiment, realgar, and mercury oxide. The alterations are mainly silicification and sericitization, and, subordinately, baritization and montmorillonitization. According to the current classification of the volcanic epithermal gold-silver deposits, the Nongduke deposit should be of high-sulfur acid sulphate type. Fluid inclusion studies show that the main ore-forming process occurred in the temperature range of 130~221 °C. The correlation trend between t_h and salinity of the ore-forming fluids implies that a buried magma chamber might exist under the deposit. The S, Pb isotope data also indicate that the ore-forming metals were mainly derived from the back-arc volcanics. The deposit was produced by the combined interaction of magmatic fluids and meteoric water recycling through the ore-bearing volcanics.