

滇西羊拉矿区层状铜矿床复合成因的 地质地球化学证据

朱俊¹⁾, 李文昌²⁾, 曾普胜^{3,4)}, 尹光候²⁾, 王彦斌⁵⁾, 王勇⁶⁾, 余海军²⁾, 董涛²⁾, 胡永斌¹⁾

1) 昆明理工大学, 昆明, 650093; 2) 云南省地质调查局, 昆明, 650051;

3) 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京, 100025; 4) 云南财经大学, 昆明, 650221;

5) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 6) 东华理工大学, 江西抚州, 344000

内容提要:滇西羊拉矿区里农矿段层状铜矿体产于与扩张有关的火山—沉积岩系中, 含矿岩系内部含中泥盆统至下二叠统构造岩块, 但成因上具相似性, 硅质岩稀土元素特征显示其形成于大陆边缘—半深海环境。矿体寄主岩石主要为富铁的矽卡岩, 多个矿体呈层状, 似层状顺层产出, 向西缓倾, 延伸大于 2km, 受到地层层位的控制, 矿体与印支期花岗岩闪长岩体的接触关系并不明显, 与传统接触交代矽卡岩型矿床存在较大差异。本文对里农矿段最具代表性的 2、5 号层状矿体及其围岩进行了岩石矿物以及稀土元素地球化学研究, 结果表明矿体具同生沉积特征, 含矿矽卡岩富铁, 远高于正常接触交代矽卡岩。推断本区矽卡岩化应广泛作用于里农组和江边组中上段各类岩石, 这样铁能够从原生矿层中的黄铁矿、胶黄铁矿得到补充。 δEu 与铜含量呈线性正相关可能说明矽卡岩化对矿体不同程度的叠加富集作用。里农层状铜矿床的成因可概述为: 新古生代拉张背景下海底喷流热水活动形成了里农原生硫化物层状矿体, 层状矿体与赋矿火山—沉积岩在空间上共存, 印支期岛弧花岗岩闪长岩对原生层状矿体进行了不同程度叠加改造富集, 形成了矽卡岩富厚矿体, 因此认为羊拉层状矿床为具层控特征的复合成因矿床。

关键词: 层状铜矿; 矽卡岩; 层控矿床; 云南德钦羊拉矿区

滇西德钦羊拉铜矿是近年来发现且目前已进行开发投产的大型铜矿床, 是西南三江地区重要的铜矿产地。矿床位于“三江”造山带中段的中咱地块与昌都—兰坪陆块间的金沙江缝合带内, 一直以来不同学者对于羊拉铜矿的成因问题持有不同的见解和观点, 早期云南地勘局第三地质大队对羊拉铜矿做过多年的勘查评价工作, 认为矿床具有矽卡岩型—斑岩型矿化特点。由于矿床在空间上与矽卡岩关系密切, 因而羊拉矿床一直被认为是接触交代矽卡岩型矿床, 曲晓明等(2004)从赋矿岩系和矿床地球化学角度对此提出了论证, 王立全等(2002)认为羊拉矿床是洋内弧环境中产出的 VHMS 矿床, 何龙清(1998)、战明国(1998)、路远发(1999)等认为其主要成矿作用为海底喷流热水沉积作用, 为喷流—沉积型, 后来魏君奇(2004)、陈开旭(2002)、潘家永(2000)等提出羊拉矿床的形成是多期多类型成矿作用叠加发展的结果。综合前人的研究成果可以看

出, 关于矿床争议的焦点之一在于印支期岛弧花岗岩岩浆活动之前羊拉矿区有无成矿作用, 如果有, 其成矿的地质背景又如何? 本文在野外地质调查和室内工作的基础之上, 重点以羊拉矿床最具代表性的里农矿段 2 号、5 号层状矿体作为研究对象, 从层状铜矿体及其含矿岩系的矿物学、岩相学、元素地球化学的角度, 对羊拉铜矿的成矿环境, 矿化特征, 矿床的复合成因作出相应论证。

1 区域成矿地质背景

羊拉铜矿区位于古特提斯构造域内中咱微陆块与昌都—思茅地块相夹持的金沙江板块结合带中段。该区早古生代在扬子陆块基底上发育稳定的台地相碳酸岩盐、碎屑岩沉积; 晚古生代金沙江洋开始发育, 石炭纪为金沙江洋的扩张阶段, 自大陆裂解—海底扩张阶段本区发育一套斜坡相碎屑浊积岩、碳酸岩盐浊积岩沉积, 同时伴随广泛的基性岩浆活动;

注: 本文为国家科技支撑计划项目(编号 2006BAB01A07)与 973 计划项目(编号 2009CB421007)的成果。

收稿日期: 2010-05-21; 改回日期: 2010-11-20; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 朱俊, 男, 1984 年生。博士研究生。研究方向为成矿规律与成矿预测。Email: zhujun1002km@yahoo.cn。

早二叠世洋盆宽度达到 1836km(莫宣学等,1993),岛弧火山活动始于早二叠世末期,形成一套中基性火山岩系和花岗闪长岩岩石组合;早、中三叠世,金沙江两侧的地块开始发生碰撞,形成规模巨大的蛇绿混杂体,晚三叠世造山带内形成一套陆内红色磨拉石建造及走滑拉分的局限盆地沉积。从洋盆形成,汇聚消亡,到碰撞造山带形成以及陆内变形的各个地质时期,金沙江带内均有发育程度不等的成矿作用产生,形成了规模不等,强弱不一的矿化(李定谋等,2002)。

2 含矿岩系特征

2.1 含矿岩系层序与时代归属

羊拉铜矿含矿岩系原定二叠系嘎金雪山群上亚群,为原四川区调队在进行 1:20 万得荣幅(1977)时按照层序地层系的思路命名的,矿床赋存于一套火山—沉积岩系,为由细碎屑岩、变火山岩、碳酸盐岩等组成的不等厚互层沉积—火山建造。近年来诸多学者(林仕良等,2004;曲晓明等,2004;李定谋等,2002;)研究指出嘎金雪山群是由不同岩性,不同时代、不同规模的构造岩片混杂堆积而成的非史密斯单元,已有年代学及古生物资料显示含矿岩系不是一个时限的组合,而是包括泥盆系、石炭系、二叠系不同岩相、岩性的混杂,目前的研究尚难将各时代岩片准确解离,原因在于:

- (1)准确限定各岩片时代的同位素年龄数据和古生物证据仍然缺乏。
- (2)含矿岩系整体向西缓倾,矿区低角度逆冲推覆普遍,其构造面与地层层面近于一致,且岩性岩相变化无显著差异,各岩片变质变形程度相似,不易识别判定地层有序或是无序。

目前矿区地层将含矿岩系划入泥盆系,依据为含矿岩系上部层位发现中晚泥盆世牙形石,而含矿岩系产状相对稳定,故将其视为成层有序的连续地层进行划分。虽然在认识上有其局限性,但该划分方案在岩性描述和岩性分层上较为详细,因此可作为确定岩石类型、岩石组合的参考,据此方案划分得到的矿区地质略图见图 1。

2.2 含矿岩系岩石类型

按照目前矿区地层划分,含矿岩系为下泥盆统江边组中段—一中—上泥盆统里农组上段。从图 1 可以看出里农矿段的层状矿体清楚地产于印支期花岗闪长岩与江边组、里农组地层之间。含矿岩系综合地层柱状图见图 2,由于地层遭受较强的变形变质

作用,其厚度数据失真严重,仅作参考,对于赋存矿体的 5 个岩性段描述如下:

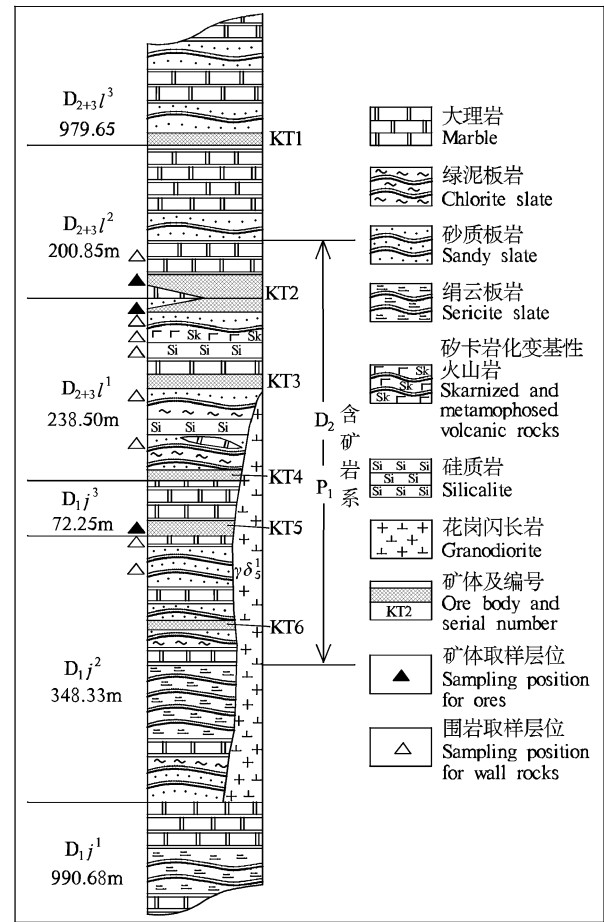


图 2 德钦羊拉铜矿区含矿岩系综合柱状图
Fig. 2 Synthetic column of ore bearing rock series of the Yangla copper deposit, Deqin County

- (1)江边组中段:灰色中层状绢云板岩、砂质板岩为主,次为浅灰绿色绿泥板岩、灰色中—厚层状细—中晶大理岩。
- (2)江边组上段:主要为灰色中—厚层状、块状细晶大理岩。
- (3)里农组下段:由浅灰色砂质板岩、深灰色绿泥板岩、灰白色条纹条带状硅质岩,薄层状大理岩组成,少量矽卡岩化变基性火山岩、火山碎屑岩,砂质板岩中含大理岩透镜体。
- (4)里农组中段:灰色、浅灰白色厚层—块状中细晶大理岩、条带状大理岩为主,少量砂质板岩。
- (5)里农组上段:灰色薄—中层状砂质板岩、绿泥板岩为主,局部夹大理岩透镜体,上部大理岩增多。

含矿岩系为一套浅海—一次深海相火山岩、砂泥

质硅质复理石建造,以里农组下段最具代表性,深灰色、灰绿色绿泥板岩为火山岩水解蚀变的产物,它伴随着变火山岩碎屑与沉积岩、硅质岩、碳酸盐岩呈不等厚互层交替产出,表明火山活动与沉积环境的交替变化,可划分若干喷发—沉积旋回,岩石具纹层状、角砾状构造(图 3a、b),5 号矿体下盘纹层状岩石中见石英聚晶条带与泥质、细小基性火山碎屑互层,显示喷流—热水组构特征。另外潘家永(2001)对该铜矿多层硅质岩研究认为硅质岩是成岩时伴随着热水沉积作用形成的。

2.3 含矿岩系稀土元素特征及其指示意义

在矿体垂向方向对含矿岩系进行取样,精确测定了里农组、江边组各类岩石的稀土元素组成(表 1),样品测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,测试仪器为 Finnigan MAT 制造电感耦合等离子体质谱(HR-ICP-MS),分析精度优于 5%。

数据显示里农组与江边组砂质板岩稀土元素组成具有相同特征,表现为稀土总量高, ΣREE 为 $86.31 \times 10^{-6} \sim 168.8 \times 10^{-6}$, LREE 相对富集, LREE/HREE 为 $4.28 \sim 8.21$, Eu 亏损(δEu 为 $0.52 \sim 0.87$,里农组平均 0.64,江边组平均 0.73),无明显 Ce 异常或微弱 Ce 负异常(δCe 为 $0.77 \sim 0.97$,里农组平均 0.93,江边组平均 0.89)。砂质板岩球粒陨石标准化模式为右倾缓倾曲线(图 4a、b)。

大理岩稀土元素总量很低, ΣREE 为 $3.01 \times 10^{-6} \sim 12.92 \times 10^{-6}$, 平均 6.76×10^{-6} , LREE/

HREE 为 $1.53 \sim 4.88$,平均 3.08, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 平均 4.8,相对富集重稀土, δEu 平均 0.74, δCe 平均 0.41,均呈明显负异常,为海水中形成,其球粒陨石标准化配分模式近于平坦(图 4 c)。

里农组矽卡岩化变基性火山岩 SiO_2 含量较砂质板岩低,大量斜长石呈细小微晶和残晶分布,斑晶受后期富钙、铁的辉石、角闪石交代,示交代残余结构。该岩石在层位上以砂质板岩的夹层产出,其稀土元素总量很高,两个样品平均 ΣREE 为 252.79×10^{-6} ,这与岩石中的大量长石存在有关, LREE 更为富集, LREE/HREE 平均 11.42,明显富集轻稀土, Eu 亏损(δEu 平均 0.62)和微弱 Ce 负异常(δCe 平均 0.9)的特征与砂质板岩相同,球粒陨石标准化配分模式为右倾曲线,也与砂质板岩类似,它与砂质板岩、硅质岩、构成了里农组火山—沉积岩系。

硅质岩 SiO_2 含量为 $80\% \sim 85\%$,稀土总量介于该区砂质板岩与大理岩之间, ΣREE 为 $49.46 \times 10^{-6} \sim 72.82 \times 10^{-6}$,这比潘家永(2000,2001)所得到的矿区 SiO_2 含量更高($>97\%$)的硅质岩稀土总量高,也高于大多数环境下的硅质岩,可能是由于硅质岩形成时受火山物质的影响,本次所取硅质岩来自平硐 3225 和平硐 3200,岩石新鲜,具明显纹层状,岩石暗色纹层部分含有火山物质蚀变而成的绿泥石,同时硅质岩含泥质和碎屑组分,当泥质组分增加,稀土元素含量相应增加,因此硅质岩稀土总量偏高。 LREE/HREE 为 $5.82 \sim 7.52$,与砂质板岩一致,硅质岩具明显的 Eu 负异常(δEu 平均 0.45)和

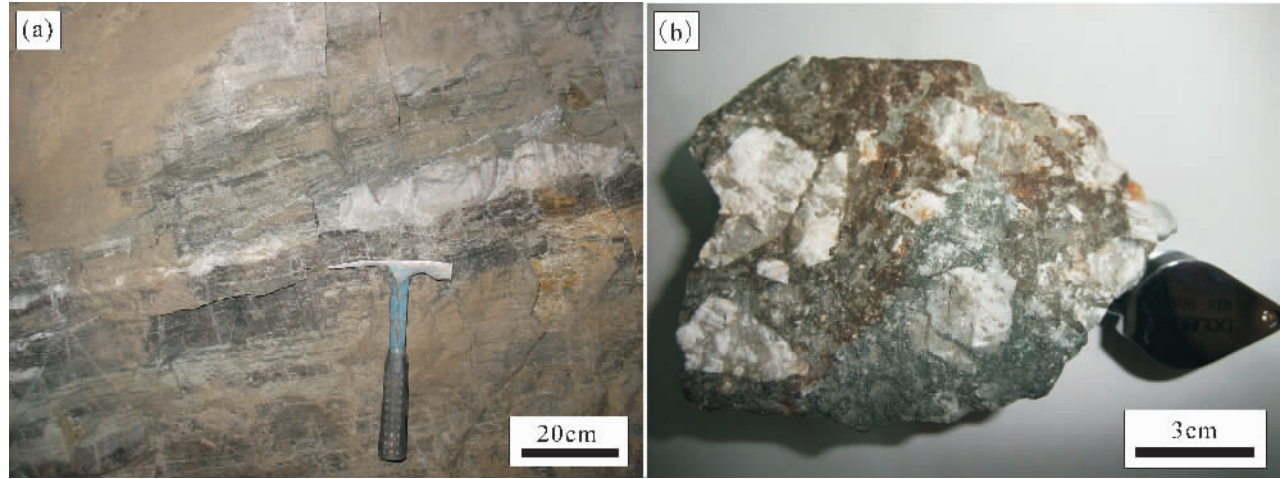


图 3 德钦羊拉铜矿区围岩成分构造特征

Fig. 3 Composition and structure of wall rocks of the Yangla copper deposit, Deqin County

(a) 层状硅质岩;(b) 角砾状构造,角砾成分为方解石,胶结成分为绿泥石、粉砂和金属硫化物

(a) bedded silicolite; (b) brecciated structure;angular pebbles consist of calcite; isopachous cements are chlorites, silts and sulfides

表 1 羊拉铜矿区里农矿段矿体主要围岩稀土元素分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 1 REE elements analysis($\times 10^{-6}$) of the wall rock from Linong ore block in Yangla copper deposit

岩性	矽卡岩化 变基性火山岩		里农组砂质板岩					江边组砂质板岩					大理岩					硅质岩	
样 号	PD3275 -7	PD3275 -9-2	PD3250 -18	3225KT2R 9-2	3225KT2R 9-3	3225KT2R 11-3	PD3150 -4	PD3075 -1	PD3050 -6	PD3050 -3-1	LP1 -8	LP1 -24	PM-16 -1	PM-13 -1	PD3590 -3-2	LiN-10 -2	PM-27 -1	PD3225 -14	PD3200 -8-2
La	50	79.4	29	27.8	16.7	23.5	32.5	19.8	17.9	34.5	24.2	27.1	0.765	0.585	1.95	3.82	2.26	17.5	10.9
Ce	77.7	131	53.5	47.4	31.7	43.6	58.9	35.2	34.7	68.4	42.8	37.6	0.823	0.48	1.37	1.81	1.88	28.4	18.5
Pr	9.11	15.1	6.73	5.38	4.07	5.37	7.04	5.17	4.38	8.27	5.28	5.14	0.164	0.147	0.459	0.656	0.411	3.52	2.26
Nd	31.8	53.8	25.8	21.5	16.4	22.2	25	20.2	17.8	32.1	21.3	19.4	0.559	0.461	1.2	2.45	1.31	12.2	8.54
Sm	5.03	9.18	5.12	4.33	3.32	4.29	4.18	4.57	4.36	5.93	4.01	3.36	0.239	0.106	0.264	0.473	0.216	2.32	1.68
Eu	0.778	2.3	1.15	0.928	0.873	0.944	0.83	1.17	1.05	1.28	0.997	1.14	0.07	0.044	0.065	0.115	0.068	0.33	0.319
Gd	4.89	7.29	4.49	3.9	3.5	4.08	4.81	4.68	3.62	4.8	4.57	4.08	0.26	0.204	0.213	0.7	0.309	2.4	1.87
Tb	0.767	1.14	0.817	0.662	0.592	0.663	0.864	0.853	0.723	0.815	0.772	0.617	0.055	0.046	0.061	0.145	0.064	0.393	0.326
Dy	4.49	6.75	5.01	4.55	3.65	4.29	4.84	5.64	4.73	5.21	5.45	3.85	0.394	0.375	0.367	1.07	0.336	2.54	1.97
Ho	0.85	1.25	1.02	0.857	0.732	0.935	0.934	1.16	0.918	1.01	0.998	0.712	0.096	0.085	0.077	0.226	0.077	0.488	0.39
Er	2.33	3.76	2.83	2.38	2.35	2.48	2.74	3.48	3.01	2.9	2.76	1.99	0.263	0.226	0.241	0.693	0.207	1.25	1.3
Tm	0.329	0.583	0.454	0.394	0.319	0.426	0.434	0.562	0.474	0.447	0.4	0.271	0.04	0.033	0.04	0.098	0.026	0.192	0.182
Yb	2.08	3.05	2.62	2.54	1.83	2.5	2.83	3.22	3.35	2.72	2.43	1.85	0.18	0.199	0.186	0.572	0.201	1.08	1.05
Lu	0.315	0.494	0.412	0.409	0.275	0.383	0.513	0.523	0.521	0.417	0.382	0.295	0.031	0.023	0.018	0.087	0.038	0.204	0.168
Σ REE	190.47	315.1	138.95	123.03	86.31	115.66	146.42	106.23	97.54	168.8	116.35	107.41	3.94	3.01	6.51	12.92	7.4	72.82	49.46
$\frac{\Sigma \text{LREE}}{\Sigma \text{HREE}}$	10.87	11.96	6.87	6.84	5.52	6.34	7.15	4.28	4.62	8.21	5.55	6.86	1.99	1.53	4.41	2.6	4.88	7.52	5.82
δEu	0.44	0.79	0.67	0.64	0.72	0.63	0.52	0.71	0.74	0.67	0.66	0.87	0.79	0.84	0.77	0.56	0.74	0.39	0.51
δCe	0.88	0.91	0.92	0.93	0.93	0.93	0.94	0.84	0.94	0.97	0.91	0.77	0.56	0.39	0.35	0.28	0.47	0.87	0.9
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	5.29	4.6	3.01	3.42	2.68	2.92	4.14	2.31	2.19	3.1	3.21	4.29	1.7	2.94	3.93	4.3	5.57	4.01	3.45
$(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$	1.9	1.93	1.38	1.24	1.54	1.32	1.37	1.17	0.87	1.42	1.52	1.78	1.17	0.83	0.92	0.99	1.24	1.79	1.44
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	16.21	17.55	7.31	7.38	6.15	6.34	7.74	4.15	3.6	8.55	6.71	9.88	2.87	1.98	7.07	4.5	7.58	10.92	7

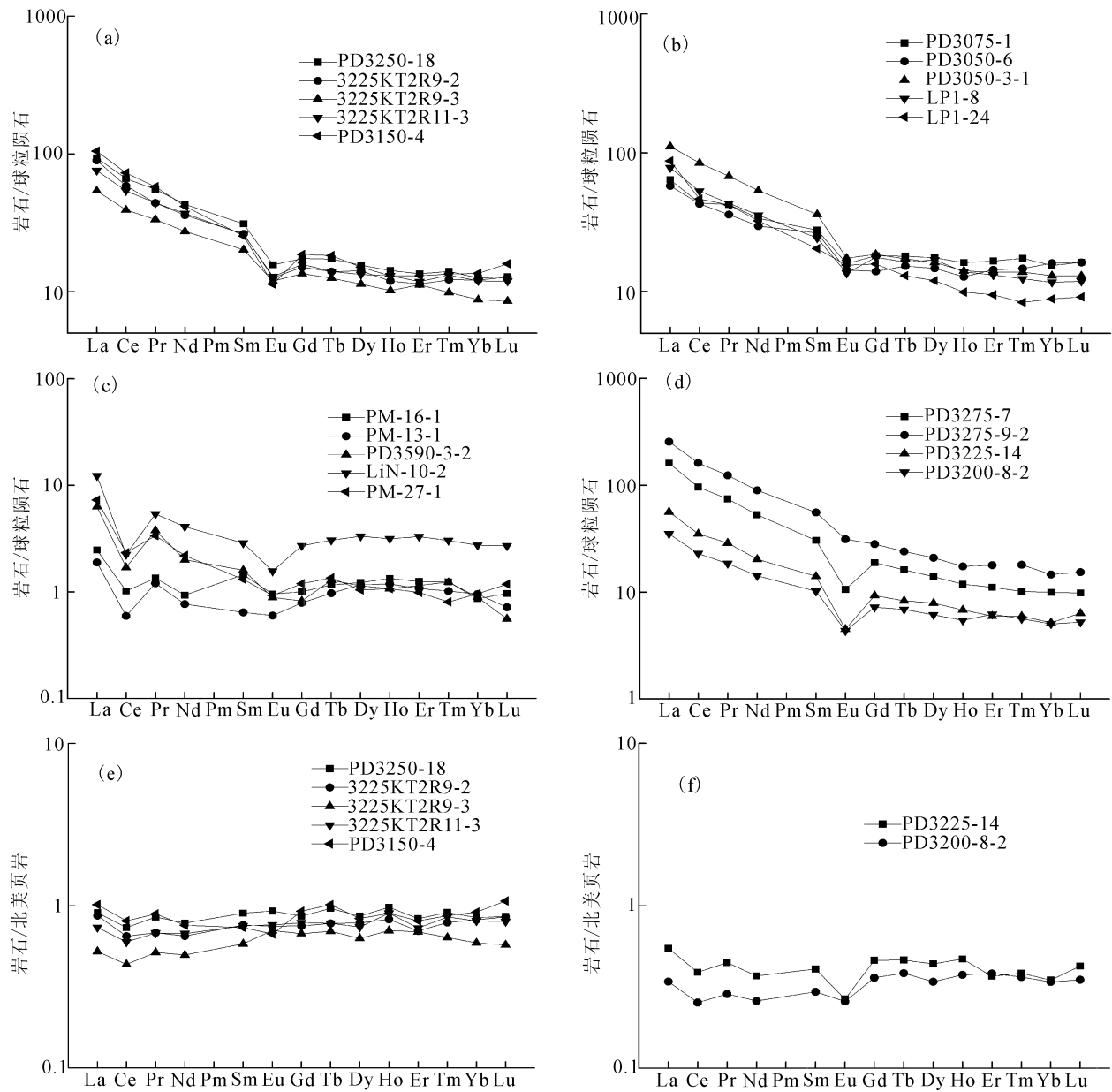


图 4 羊拉铜矿区里农矿段矿体围岩稀土元素配分模式

Fig. 4 The REE patterns for the wall rocks from Linong ore block of Yangla copper deposit

(a) 里农组砂质板岩/球粒陨石;(b) 江边组砂质板岩/球粒陨石;(c) 大理岩/球粒陨石;(d) 里农组砂卡岩化变基性火山岩/球粒陨石, 硅质岩/球粒陨石;(e) 里农组砂质板岩/北美页岩;(f) 硅质岩/北美页岩
(a) sandy slate of Linong Formation/chondrite; (b) sandy slate of Jiangbian Formation/chondrite; (c) marble/chondrite; (d) skarnized metamorphic volcanic rocks of Linong/chondrite, silicalite/chondrite; (e) sandy slate of Linong Formation/NASC; (f) silicalite/NASC

微弱 Ce 负异常(δCe 平均 0.89),硅质岩球粒陨石标准化配分模式为右倾曲线。硅质岩的 Ce 异常可以指示其沉积环境,而对三江地区的研究也表明,不同沉积相或大地构造环境的硅质岩 δCe 有明显的不同(丁林等,1995),选用 Haskin(1968)北美页岩组合标准样数据作为分析基础,其标准化配分模式为平坦型(图 4f),曲线形式和轻重稀土富集程度

均与砂质板岩相同,反映碎屑岩与硅质岩的形成环境一致,变碎屑岩稀土总量较硅质岩高的原因在于硅质岩中石英含量远高于变碎屑岩,而石英在沉积过充当了 REE 的稀释剂。对比 Murray 等(1990, 1991)的研究,两个硅质岩样品 δCe 分别为 0.79 和 0.81,低于大陆边缘沉积之硅质岩(平均 1.09),高于深海平原硅质岩(0.5~0.76,平均值 0.6);远高

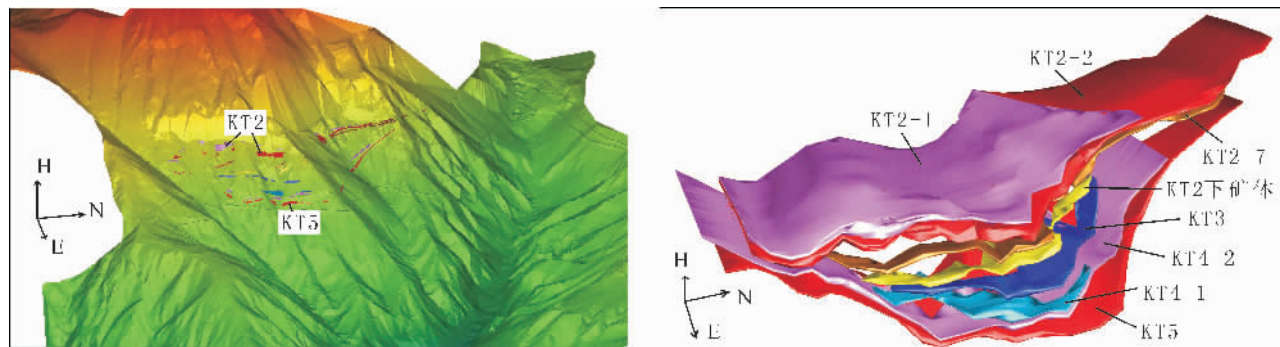


图 5 羊拉矿床里农矿段层状矿体形态模型图

Fig. 5 Bedded orebody model of the Linong ore block, Yangla copper deposit

于洋脊附近的硅质岩(0.22~0.38,平均值为0.3),因此,该硅质岩指示该扩张时期海水相对较浅,相当于大陆边缘一半深海过渡的环境;硅质岩(La/Yb)_N分别为1和1.57,轻稀土的弱富集同样表明其分异特征与大陆边缘一半深海环境沉积的硅质岩相近。

稀土元素特征表明含矿岩系内的碎屑岩、硅质岩、变火山岩具有相同的成因,形成于大陆边缘一半深海环境,结合含矿岩系的时代跨度自中泥盆世至早二叠世,可以合理推断江边组中—上段与里农组地层为金沙江洋裂解—扩张阶段的斜坡相碎屑物、洋盆沉积物与火山岩的混杂,其形成与洋盆初始裂解—扩张活动关系密切。

3 矿体复合成因的依据

3.1 矿体的层控性

从含矿岩系综合柱状图中可以看到自上而下依次产出KT1~KT6号矿体,1号矿体产于花岗斑岩爆破角砾岩筒,呈现明显后成型,李定谋等(2002)依据已有测年数据推断为燕山晚期形成。而6号矿体

系北东走向充填于构造裂隙的后生脉状矿体,与KT2~KT5层状、似层状顺层分布的矿体有本质区别,而诸多争议的焦点也就集中于KT2~KT5的成因归属上。

矿体产状是成矿作用的直观反映。通常认为,与围岩呈不整合产出的脉状矿体为后生成因,呈整合产出的层状矿体为同生成因。对于羊拉铜矿里农矿段的矿体而言,多个矿体呈层状,似层状顺层产出,向西缓倾,受到一定地层层位的控制,南北顺层延伸远,局部远离里农岩体,具多层性,产状总体稳定,随地层的弯曲变化而发生相应的局部变化。矿体延伸与区内晚古生代的南北向凹陷扩张线和火山活动走向一致,且严格受到里农组、江边组中—上段火山—沉积岩系岩相控制,具层控的特征,新的钻孔资料揭示出离里农岩体更近的KT5也并不沿接触带分布,深部也显示顺层的特点,利用新的勘探资料所建立的矿体模型见图5。2号矿体与5号矿体特征见表2。

表 2 羊拉矿床里农矿段 2 号、5 号矿体特征

Table 2 Characteristics of No. 2 and No. 5 orebody in the Linong ore block, Yangla copper deposit					
矿体	赋矿层位	含矿岩石	矿石矿物组合	产状特征	铜品位
KT2	里农组下段(D ₂₊₃ ¹)、中段(D ₂₊₃ ²)。	矿体顶板为大理岩,底板为砂质板岩,硅质岩;含矿岩石类型复杂,有砂卡岩、绿泥板岩、砂质板岩、绿泥石化火山碎屑岩等。	黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉锑矿、毒砂、磁铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿、白钨矿等。	层状、似层状,有分支分岔复合现象,延伸(2000m,南延由于断裂而错失。	0.3~7.82%,平均0.88%。
KT5	江边组中段(D _{1j} ²)、上段(D _{1j} ³)。	矿体顶板为大理岩,钻孔资料揭示其底板岩性在不同地段亦不同,主要有砂质板岩、大理岩及印支期花岗闪长岩,含矿岩石主要为砂卡岩,砂质板岩。	黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、方铅矿、辉锑矿、磁铁矿。	层状,延伸1625m,向北被第四系所掩盖。	0.32~2.04%,品位变化稳定,平均0.94%。

3.2 矿石物质组分

KT2 与 KT5 矿石类型以含铜矽卡岩型占绝对优势, 次为含铜砂板岩型和含铜铁石英脉型。金属矿物主要有黄铜矿(CuFeS_2)、黄铁矿(FeS_2)、磁黄铁矿($\text{Fe}_5\text{S}_6\text{—Fe}_{16}\text{S}_{17}$), 矿石中含少量斑铜矿(Cu_5

FeS_4)、铜蓝(CuS)、白铁矿(FeS_2)、方铅矿(PbS)、闪锌矿(ZnS)、辉铋矿(Bi_2S_3)、辉锑矿(Sb_2S_3)、辉铜矿(Cu_2S)及辉钼矿(MoS_2)等。脉石矿物有钙铁辉石、钙铁榴石、透辉石、透闪石、阳起石、绿泥石、绿帘石、铁白云石、方解石、石英等, 以矽卡岩型矿物组合为

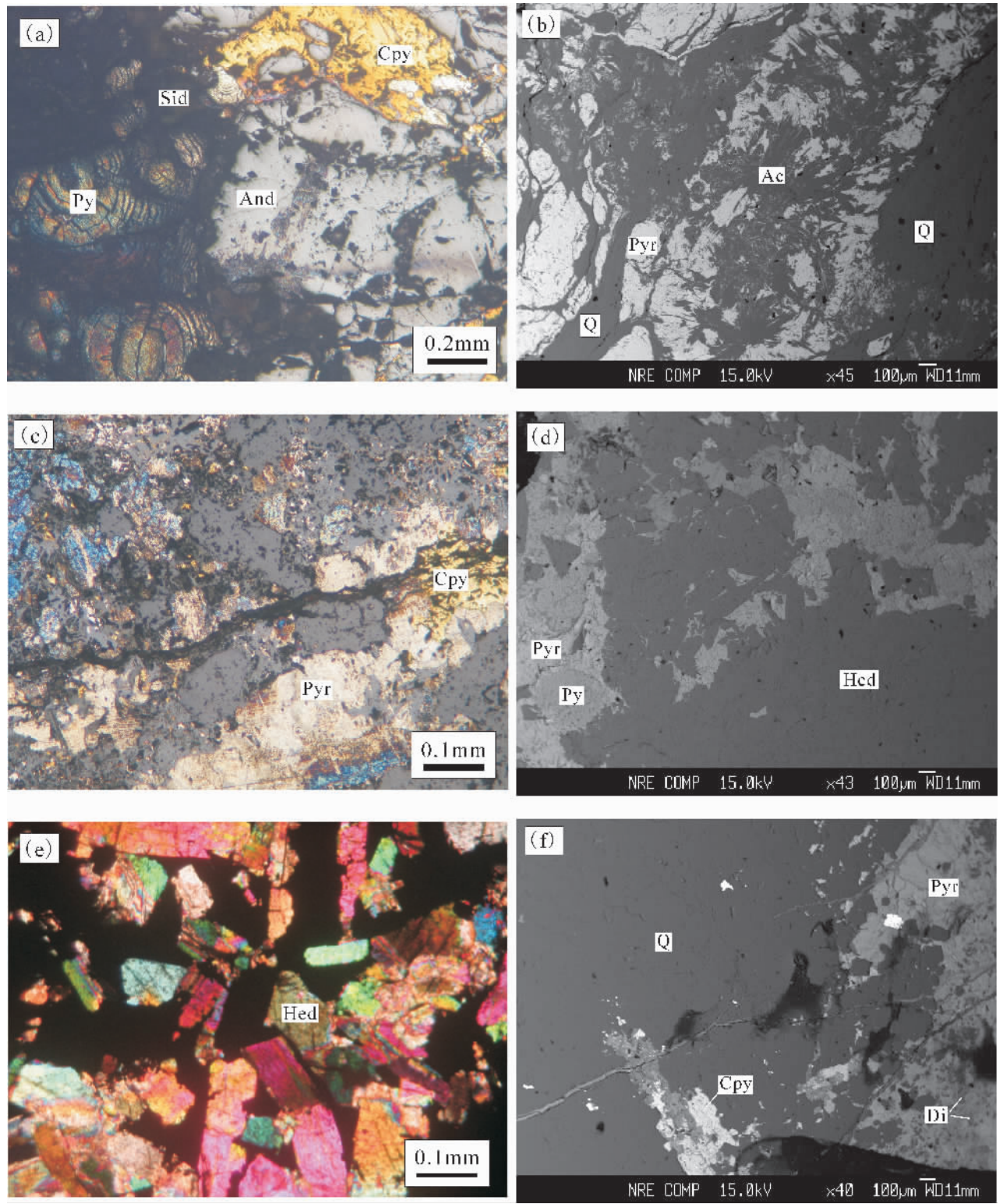


图 6 层状铜矿体的显微构造特点

Fig. 6 Microstructures of bedded copper orebodies

(a) 同生沉积鲕粒, 鲕粒由同心状黄铁矿组成, 基质为菱铁矿; (b) 束状阳起石交代钙铁辉石; (c) 浸染状黄铜矿交代磁黄铁矿; (d) 钙铁辉石矽卡岩中磁黄铁矿沿黄铁矿边缘交代; (e) 金属硫化物沿自形钙铁辉石空隙充填; (f) 石英脉与矽卡岩接触裂隙中黄铜矿交代磁黄铁矿; Py—黄铁矿; Cpy—黄铜矿; Sid—菱铁矿; And—钙铁榴石; Pyr—磁黄铁矿; Ac—阳起石; Q—石英; Hed—钙铁辉石; Di—透辉石

(a) syndeositional structure of ooids, which consist of concentric pyrite and the matrix is siderite; (b) hedenbergite replaced by bunchiness actinolite; (c) pyrrhotite replaced by chalcopyrite with disseminated structure; (d) pyrrhotite replacement along the edge of pyrite in hedenbergite skarn; (e) metal sulfides filling interspace of automorphic hedenbergites; (f) pyrrhotite replaced by chalcopyrite in space between quartz reef and skarn; Py—pyrite; Cpy—chalcopyrite; Sid—siderite; And—andradite; Pyr—pyrrhotite; Ac—actinolite; Q—quartz; Hed—hedenbergites; Di—diopside

主。

3.3 矿石物结构构造标志

矿石结构构造是成矿作用阶段和成矿方式的重要标志, KT2 与 KT5 的矿石结构构造主要划分为 3 种类型, 一种是同生沉积的结构构造, 如球粒状、胶状结构和纹层状, 角砾状构造, 二是变质作用下形成的, 如变晶结构、微晶结构、揉皱状和角砾状构造等; 三是矽卡岩化阶段交代作用下形成, 如交代假像结构、交代溶蚀结构和块状、脉状构造。

在成岩阶段已初步形成矿体或矿源层, 其依据为: 见成岩期原始沉积的黄铁矿鲕粒与菱铁矿(图 6a), 胶黄铁矿具收缩裂纹的同心环状结构, 部分被其他硫化物交代, 5 号矿体硫化物矿石中也见黄铁矿在非金属物质中形成同心环带状和胶状体, 为同生沉积阶段的标志; 它不仅构成矿体的胚胎层, 而且对铜、金等成矿元素的沉淀起沉淀剂作用。

矿体也显示出成岩改造交代的特点, 矽卡岩化使大多数矿石原生的组构面目全非并使有用组分进一步使其富集。依据为:

磁黄铁矿交代黄铁矿, 磁黄铁矿围绕黄铁矿颗粒交代, 是在硫不足的较还原的环境下沉积形成后底部热液交代作用的产物, 这与退变质过程中短暂的温度升高或氧逸度降低有关, 同时矽卡岩矿物交代黄铁矿、磁黄铁矿的现象常见, 如钙铁榴石交代黄铁矿、束状阳起石交代脉状磁黄铁矿(图 6b、d)。

以黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿为主的金属矿物呈浸染状充填于自形粒状钙铁辉石粒间空隙或裂隙石英脉中(图 6c、e、f), 表明矽卡岩化阶段对成矿的进一步富集有着显著作用。

另外, 在矿区并非矽卡岩化伴随着矿化, 如里农岩体北路边与里农组接触带矽卡岩化强烈, 矽卡岩由钙铁榴石、钙铁辉石、透辉石、阳起石、绿帘石等组成, 粗粒结构、块状构造, 接触带未见矿化; 而含矿矽卡岩为细粒结构、除块状构造外, 也可见条带状构

造, 野外观察表明条带状构造受到原岩的控制。

3.4 矿石稀土元素与微量元素指示意义

由表 3 可见, 矿石富 Cu, 贫 Zn、Pb, 矿石的 Σ REE 总量低, 变化为 $10.7 \times 10^{-6} \sim 101.1 \times 10^{-6}$, 平均 31.84×10^{-6} 。LREE/HREE 比值平均为 $2.59 \sim 4.6$, $(La/Yb)_N$ 为 $2.42 \sim 5.8$, 轻稀土弱富集, δCe 均 < 1 , 为 $0.52 \sim 0.85$, 呈明显负异常, 这些特征与围岩一致。Eu 正、负异常及无异常皆有, 说明成矿作用过程及成矿环境并非单一, 浸染状矿石铜品位 $< 1\%$, δEu 除样品 PD3250-15-1 外其余均呈负异常($0.5 \sim 0.76$); 而块状硫化物矿石铜品位 $> 1\%$, δEu 除样品 PD3275-10-2 无显著异常(0.92)外, 其余样品 δEu 为 $1.13 \sim 2.65$, 平均 1.7 , 正异常显著, 另一方面, 虽然高品位矿石和低品位矿石的 Σ REE 存在差异, 但是稀土元素配分曲线形态相似(图 7), 说明具有同源性。研究发现矿石 δEu 与铜含量呈一定线性正相关, 图 8 中直线相关系数 0.82 , 拟合系数 0.62 , 这种线性关系可解释为印支期里农花岗岩体对同生沉积层状低品位矿体进行了不同程度叠加改造使其进一步富集, 低品位($< 1\%$)矿石与围岩具有一致的 δEu 负异常, 保留了大多数同生阶段岩石的地球化学特征, δEu 正异常越显著, 矿石品位越高, 可能表明受到矽卡岩化阶段的叠加改造富集作用越强。

4 讨论

4.1 羊拉层状矿床与典型接触交代矽卡岩型矿床的差异

一般认为, 传统接触交代矽卡岩主要产于中酸性侵入体与碳酸盐的接触带, 其产状受接触带构造和特点控制, 羊拉矿区规模最大的 2 号矿体和 5 号矿床矿石主要为含矿矽卡岩, 但是矿体在产状、分带性、规模等方面与传统接触交代理论存在很大差异, 接触交代理论不能解释层状矿体成因。2、5 号厚层

状矿体顺层产出,与上下围岩界限清楚,矿石呈细粒结构,矿物组合为钙铁辉石—钙铁榴石—钙铝榴石。从里农矿段的实际情况出发,矿区呈互层状产出的砂质板岩、碳酸盐岩、变火山岩可能构成了形成矽卡岩的物质基础,从表 4 中可以看出,层状矽卡岩富含铁,平均 27.12%,远远高于正常的接触交代矽卡岩,也显著高于本区其他矽卡岩体(路远发等,1999),矽卡岩矿物中钙铁辉石和钙铁榴石占优势,透辉石与钙铝榴石占较小比例,从表 4 中的大理岩与里农岩体的化学组成来看,二者含铁并无异常。对比我国 300 多个矽卡岩矿床石榴子石和辉石统计,尤其是与铜相关的矿床多数为钙石榴子石和透辉石,极少出现钙铁榴石,特别是钙铁辉石(李定谋等,2002),羊拉层状矿体矿石矿物极为富铁的特征

使之区别于大多数单一接触交代成因的矽卡岩型矿床。本次研究认为印支期里农岩体的侵位使交代作用广泛发生于江边组和里农组火山—沉积岩系,这样铁可从早期火山—沉积阶段形成的原生层状矿体中大量胶黄铁矿和黄铁矿得到补充。

印支期的酸性岩浆活动引起区域压力增大和温度升高,创造了形成矽卡岩的物理化学条件,分布于岩体和含矿岩系各层内各矿物的粒间饱和溶液在这种条件下变成热水溶液,在浓度梯度差的影响下发生接触扩散交代作用,里农岩体内的粒间溶液为SiO₂、Al₂O₃所饱和,碳酸盐岩中的钙等通过粒间溶液扩散到岩浆岩体内,岩体内的硅、铝、钾等向碳酸盐岩中扩散,形成了以透辉石、石榴子石为特征的矽卡岩。另外需要指出的是由于在火山—碎屑岩中存

表 3 里农矿段层状矿体矿石稀土元素与微量元素分析数据表(×10⁻⁶)

Table 3 REE and trace elements analysis(×10⁻⁶) for ores from bedded orebody of the Linong ore block

矿石构造	2 号矿体						5 号矿体		
	块状	块状	块状	块状	浸染状	浸染状	块状	浸染状	浸染状
样号	PD3275-13-2	PD3275-2	PD3275-10-2	PD3200-4	PD3250-14	PD3250-15-1	L3-1	L3-3	PD3075-6
La	4.91	1.83	5.93	2.72	7.54	6.61	2.98	2.43	21.1
Ce	4.74	2.6	10.1	3.88	13.9	9.4	4.91	3.53	34.2
Pr	0.998	0.557	1.57	0.809	2.04	1.38	1	0.667	4.4
Nd	3.25	2.4	7.56	2.92	8.48	5.23	4.76	2.78	18.6
Sm	0.626	0.401	1.52	0.58	1.79	0.975	0.954	0.706	3.8
Eu	0.726	0.277	0.575	0.294	0.311	0.461	0.523	0.211	0.945
Gd	0.948	0.611	2.02	0.921	1.73	1.36	1.08	0.86	4.35
Tb	0.15	0.125	0.333	0.142	0.379	0.231	0.2	0.14	0.794
Dy	1.2	0.61	1.88	0.971	2.67	1.61	1.13	1.19	5.25
Ho	0.251	0.167	0.389	0.184	0.523	0.337	0.263	0.232	1.05
Er	0.738	0.458	1.09	0.702	1.57	0.963	0.792	0.647	3.19
Tm	0.088	0.088	0.145	0.078	0.226	0.138	0.099	0.126	0.423
Yb	0.571	0.499	0.895	0.608	1.47	0.914	0.644	0.678	2.62
Lu	0.102	0.086	0.121	0.106	0.248	0.17	0.088	0.117	0.38
ΣREE	19.298	10.709	34.128	14.915	42.877	29.779	19.423	14.314	101.102
LREE/HREE	3.77	3.05	3.97	3.02	3.86	4.2	3.52	2.59	4.6
δEu	2.65	1.57	0.92	1.13	0.5	1.13	1.45	0.765	0.655
δCe	0.52	0.62	0.8	0.63	0.85	0.75	0.68	0.67	0.85
(La/Yb) _N	5.8	2.47	4.47	3.02	3.46	4.88	3.12	2.42	5.43
Cu	38839	33917	19822	11231	8475	5408	10160	5430	3998
Zn	1376	338	281	811	648	95.4	196	145	165
Pb	10.6	4.7	29.3	8.25	220	15.4	13.8	4.07	11.2
Co	16.1	26.4	22.4	30.5	100	54.7	47.1	36.4	96.8
Ni	17	0.163	34.1	13.2	27.2	21.5	7.14	9.32	56.7
Sr	4.33	1.38	4.64	174	5.42	5.85	1.98	2.05	91.4
Mo	2.37	0.657	2.08	1.62	604	4.14	0.562	0.253	2.77
Cd	36.5	13.3	14.4	8.8	8.52	5.6	11.4	3.02	0.894
Sn	1363	384	620	199	100	275	430	123	27.5
Sb	5.46	2.26	3.73	8.77	3.41	1.83	15.5	2.94	3.96
Ba	5.93	6.75	13	19	29.4	17.9	9.09	7.71	171
W	329	17.2	44.6	62	624	395	19.7	11.7	678
Bi	423	384	390	471	393	431	1276	447	281

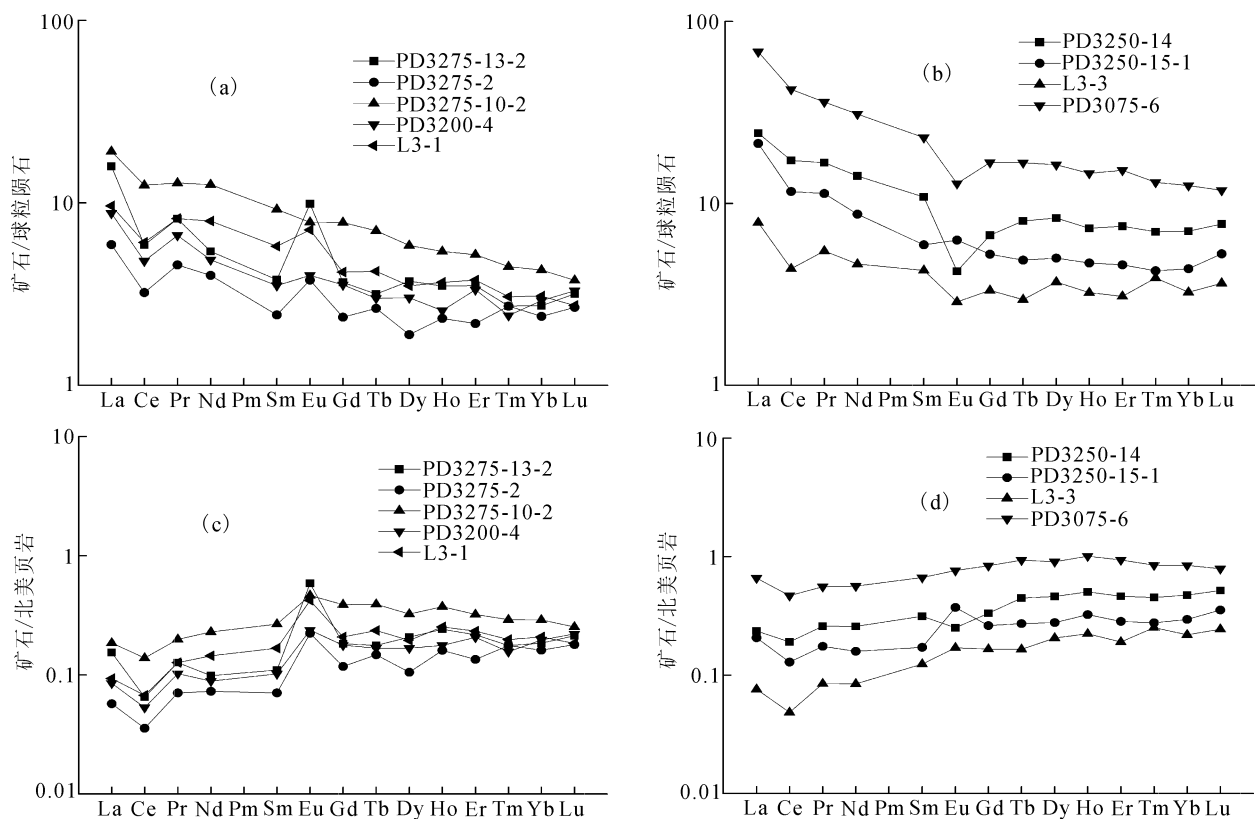


图 7 德钦羊拉铜矿区里农矿段矿石稀土元素配分模式

Fig. 7 The REE patterns for ores from Linong ore block, Yangla copper deposit, Deqin county

(a) 块状矿石/球粒陨石;(b) 浸染状矿石/球粒陨石;(c) 块状矿石/北美页岩;(d) 浸染状矿石/北美页岩
(a) massive ores/chondrite; (b) disseminated ores/chondrite; (c) massive ores/NASC; (d) disseminated ores/NASC

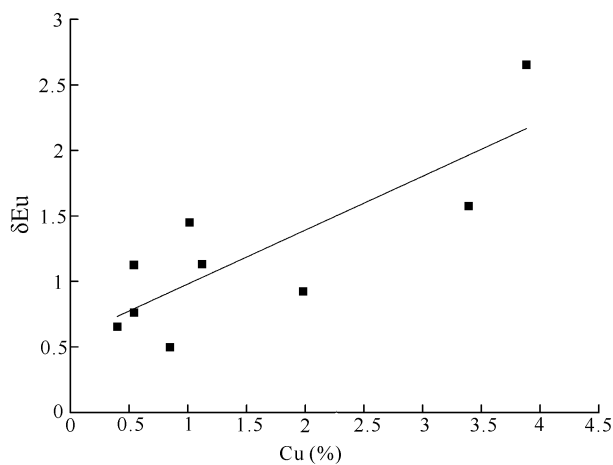


图 8 德钦羊拉铜矿区矿石 δEu —Cu 图

Fig. 8 δEu —Cu diagram for ores from the Yangla copper deposit, Deqin County

在大量硅、铁,在组分上与碳酸盐存在明显差异,而矽卡岩化过程中浓度梯度差异是扩散组分运移的动力,一旦不同岩系内的热水溶液 Ca、Si、Al、Fe 等组

分存在化学位和浓度的巨大差异,它们之间发生相向扩散作用是可能的,梁祥济等(1991)通过火山岩中交代岩的实验研究指出,物质成分和反应溶液是形成交代岩的根本因素,而温度、压力、反应溶液的 pH 值、 f_{O_2} 是影响他们形成的主要条件,只要有 Si、Al、Fe、Ca、Mg 等主要元素的存在,加上一定量 H_2O 、 CO_2 、Cl 等挥发份,在适宜的物理化学条件下都可以形成交代岩,这打破了交代岩形成的传统概念,证明了交代岩可能是多成因的;另外接触交代、沉积变质、火山作用和混合岩化实验均能产生共生的矽卡岩矿物组合(梁祥济等,1993,1994)。综上分析推断里农含矿岩系内碳酸盐岩与火山—碎屑岩系之间也可能发生组分的双向扩散作用,即火山—碎屑岩系中的硅、铁可能扩散进入碳酸盐岩中,达到平衡后最终形成了以钙铁榴石和钙铁辉石为主的矽卡岩,在此过程中,原生层状矿体中黄铁矿的铁被萃取并参与形成钙铁榴石和钙铁辉石,原生矿体中的铜被分离活化,酸性岩体结晶所产生的水热流体也富含铜,在矽卡岩化晚期阶段铜与多余的硫和铁结合,

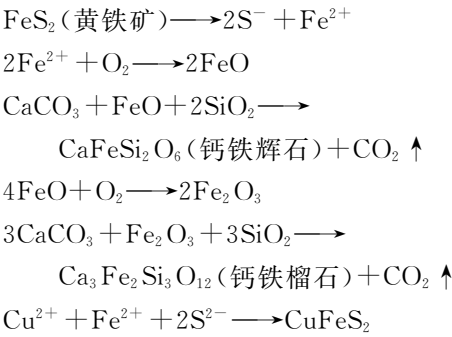
表 4 德钦羊拉矿区里农矿段几种主要岩石化学成分表

Table 4 Chemical compositions of the main rocks from Linong ore block, the Yangla copper deposit, Deqin County

岩石名称	样品数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
层状矽卡岩	6	38.90	0.09	1.93	27.12	0.40	0.95	24.78	0.04	0.02	1.80
变火山碎屑岩	2	64.32	0.59	15.21	6.12	0.07	1.73	4.15	3.42	2.35	2.59
砂质板岩	5	66.88	0.53	11.4	7.10	0.11	1.32	3.64	1.73	2.28	5.23
大理岩	6	0.99	0.01	0.34	0.28	0.02	0.57	53.49	1.30	0.06	43.06
里农花岗闪长岩	9	66.58	0.36	15.22	3.69	0.05	1.47	3.38	4.02	3.64	1.92

注:层状矽卡岩数据据路远发等(1999)。

形成黄铜矿,从而使铜进一步富集沉淀,其反应化学式可描述为:



4.2 成矿过程

含矿矽卡岩在局部地段远离岩体并保持顺层特征,说明矿体形态明显受先期硫化物矿层的展布特征控制。在矿体范围,矽卡岩化矿石品位明显高于其它类型岩石。然而层状矿体的原生矿化在先,层状矽卡岩化在后,矿床具有两期成矿特征,对比古特提斯金沙江洋的演化历史,层状矿床的成矿过程可概述为:晚古生代金沙江洋进入扩张阶段,在浅海—次深海相部位形成了火山岩、砂泥质硅质复理石建造,同时海底热水活动形成了原生胶黄铁矿层,具层控之特征,其赋矿围岩中碎屑组分多于火山组分,表明成矿时火山活动规模有限;印支期里农花岗闪长岩岩体侵位使含矿岩系广泛发生矽卡岩化,原生层状矿体受到叠加改造富集作用,形成了层状矽卡岩富矿石。目前多数学者对里农花岗岩体成因的认识较为一致,岩体年龄 227Ma(魏君奇等,1997),为金沙江结合带向西俯冲阶段陆缘弧环境下的壳幔同熔型花岗岩(魏君奇等,1997;李定谋等,2002)。综合分析,本次研究将羊拉里农矿段的层状硫化物矿体的成因概括为:原生层状矿体与赋矿火山—沉积岩在空间上共存,经历了相同的发展阶段,均为拉张环境下伴随海底火山活动形成的,印支期具岛弧性质的中酸性岩体侵位,带来了新的成矿物质和驱动力并对岛弧花岗闪长岩对原生层状矿体进行了叠加改

造,该矿床可认为是具层控特征的复合成因矿床。

5 结论

(1)羊拉矿区里农矿段层状矿体所赋存的江边组中—上段,里农组岩系由中泥盆统一下二叠统构造岩片组成,总体为一套金沙江洋扩张阶段形成的

火山—沉积建造,含矿岩系具相似地球化学特征,硅质岩地球化学特征表明其形成于大陆边缘—半深海环境。

(2)里农矿段层状矿体在产状、规模、分带性和矿物组构等方面与传统接触交代矽卡岩存在显著差异,矿物学、地球化学方面均有证据表明层状矿体具同生矿化—后期叠加改造特征。矿石的 δEu 与铜含量呈一定正相关性,矿石不同的 δEu 值可以指示铜的不同富集程度,可能代表原生硫化物矿层受到了不同程度的叠加改造作用。

(3)含矿矽卡岩富铁,远高于正常接触交代矽卡岩,这难以用里农岩体与碳酸盐岩接触交代作用来解释,本次研究将其解释为:矽卡岩化应广泛作用于里农组和江边组上段火山—沉积岩系中的各类岩石,这样铁能够从原生矿层中的黄铁矿、胶黄铁矿得到补充。

(4)羊拉矿区里农矿段层状硫化物矿床具层控特征,其成因可总结为:晚古生代拉张背景下海底喷流热水活动形成了里农原生硫化物层状矿体,印支期岛弧花岗闪长岩对原生层状矿体进行了不同程度叠加改造,形成了矽卡岩富厚矿体。里农层状铜矿床可认为是具层控特征的复合成因矿床。

参 考 文 献 / References

陈开旭,路远发,魏君奇,董芳浏,范玉华. 2002. 滇西北羊拉铜矿区成矿地质背景及多期成矿作用. 矿床地质,21(增刊):361~364.
丁林,钟大赉. 1995. 滇西昌宁—孟连带古特提斯洋硅质岩稀土元素和锶异常特征. 中国科学(B辑),25(1):93~100.
何龙清,战明国,路远发. 1998. 滇西羊拉铜矿区层序地层划分及赋矿层位研究. 华南地质与矿产,(3):38~41.
李定谋,王立全,须同瑞,刁志忠,等. 2002. 金沙江构造带铜金矿成矿与找矿. 北京:地质出版社,104~144.
梁祥济,乔莉. 1991. 火山岩中交代岩和铁矿的实验研究. 岩石矿物学杂志,10(4):300~314.
梁祥济. 1993. 混合岩化作用中交代岩和铁矿形成的实验研究. 矿床地质,12(4):360~369.
梁祥济. 1994. 钙铝—钙铁系列石榴子石的特征及其交代机理. 岩石

矿物学杂志,13(4):342~361.

林仕良,王立全. 2004. 云南德钦羊拉铜矿床构造特征. 沉积与特提斯地质,24(3):48~51.

路远发,陈开旭,战明国. 1999. 羊拉地区含矿矽卡岩成因的地球化学证据. 地球科学,24(3):298~303.

莫宣学,路凤香,沈上越,朱勤文,等. 1993. 三江特提斯火山作用与成矿. 北京:地质出版社:224~236.

潘家永,张乾,李朝阳. 2000. 滇西羊拉铜矿床稀土元素地球化学研究. 矿物学报, 20(1):44~49.

潘家永,张乾,马东升,李朝阳. 2001. 滇西羊拉铜矿区硅质岩特征及与成矿的关系. 中国科学(D辑),31(1):10~16.

潘家永,张乾,马东升,等. 2000. 滇西羊拉铜矿床稳定同位素地球化学研究. 矿物学报,20(4):385~389.

曲晓明,杨岳清,李佑国. 2004. 从赋矿岩系岩石类型的多样性论羊拉铜矿的成因. 矿床地质,23(4):431~442.

王立全,侯增谦,莫宣学,等. 2002. 金沙江造山带碰撞后地壳伸展背景——火山成因块状硫化物矿床的重要成矿环境. 地质学报,76(4):541~555.

魏君奇,陈开旭. 2004. 云南羊拉地区铜矿成矿系列. 地质科技情报, 23(2):21~24.

魏君奇,战明国,路远发,等. 1997. 滇西德钦羊拉矿区花岗岩类地球化学. 华南地质与矿产,(4):50~56.

Haskin L A, Haskin M A, Frey F A, Wildman T R. 1968. Relative and absolute Terrestrial Abundances of the Rare Earth Elements. In: Ahrens L H. ed. Origin and Distribution of the Elements, (vol. 1). Oxford:Pergamon,889~911.

Murray R W, Buchholtz ten Brink M R, Gerlach D C, Russ III G P, Jones D L. 1991. Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan complex and Monterey group, California: assessing REE sources to fine-grained marine sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 55(7): 1875~1895.

Murray R W, Buchholtz ten Brink M R, Jones D L, Gerlach D C, Russ III G P. 1990. Rare earth elements as indications of different depositional environments in cherts and shale. Geology, 18(3):268~271.

Geological and Geochemical Evidences of Compound Genesis of Yangla Bedded Copper Deposit, Northwestern Yunnan

ZHU Jun¹⁾, LI Wenchang²⁾, ZENG Pusheng^{3, 4)}, YIN Guanghou²⁾, WANG Yanbin⁵⁾, WANG Yong⁶⁾, YU Haijun²⁾, DONG Tao²⁾, HU Yongbin¹⁾

- 1) Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650093;
- 2) Yunnan Geological Survey, Kunming, 650051;
- 3) Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgy Geological Bureau, Beijing, 100025;
- 4) Yunnan University of Finance and Economics, Kunming, 650221;
- 5) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;
- 6) East China Institute of Technology, Fuzhou, Jiangxi, 344000

Abstract: The Yangla bedded Cu orebodies in Linong block occurred in volcanic—sedimentary rock series, which consist of various tectonic massif from Middle Devonian to Lower Permian and their genesis were concurrent. The REE characteristics of silicalite indicate that it has been formed in continental margin—bathyal environment. Host rocks of orebodies are mainly skarn riched in Fe, the occurrence of several orebodies are bedded and layered-like paralleled with stratum, orebodies incline toward west and extend over 2 km. The orebodies do not contact Indosinian granodiorite directly and are different from contact metasomatism skarn-type deposit. This study makes research on typical No. 2 and No. 5 orebodies and their wall rocks by petrology, mineralogy and REE geochemistry, the results show that the ores have syndepositional characteristics. Fe content in ore bearing skarn is far more than that skarn in normal contact metasomatism. It is inferred that skarnization has widely occurred in various rocks of volcanic—sedimentary rock series in Linong Formation and Jiangbian Formation, the primary syndepositional ore bed would provide Fe from pyrite and melnikovite. Positive correlation of δEu and Cu grade might indicate varying degrees of superposition and enrichment resulted from skarnization. The genesis of Linong bedded ore deposit can be concluded as follows: primary sulphide orebodies formed in Neoproterozoic as a result of submarine sedex → Indosinian island arc granodiorite reformed and upgraded primary sulphide orebodies more or less and finally turned them into thick and high grade orebodies. Yangla bedded deposit is a compound origin deposit with strata-bound characteristics.

Key words: bedded Cu ore; skarn; strata-bound deposit; Yangla ore district of Deqin, Yunnan