

浙江弄坑金银矿区黄铁矿成分标型研究

周学武^{1,2} 李胜荣¹, 鲁力², 林卫兵²

1. 中国地质大学 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074

摘要:为确定弄坑矿区金银矿化成因类型及对该矿区深部矿化远景进行预测,应用找矿矿物学方法研究了浙江武义弄坑金银矿区黄铁矿成分及其特征比值(如 S/Fe、Fe/(S+As)、Co/Ni、S/Se、Se/Te、Au/Ag)、S、Pb 同位素特征,分析了黄铁矿成分的成因标型及找矿标型,为该矿化区矿化成因类型的确定提供可靠性的矿物学依据。同时,利用黄铁矿微量元素的三角形图解对本矿区深部矿化远景进行了预测。结论显示,该区金银矿化属浅成低温火山热液成因类型,在矿化区的深部地段可望找到富的金银矿化体。

关键词:黄铁矿;成分标型;金银矿化;浙江弄坑

中图分类号:P578.2⁺92 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2005)04-0317-10

浙江武义弄坑矿区位于浙江武义县境内,地处余姚-遂昌加里东褶皱隆起带的南西段,为陈蔡-遂昌金银铅锌三级成矿带遂昌金银四级成矿远景区的北东端部分。

区域内由两大构造层构成,分别为前震旦系陈蔡群变质岩基底和中生代火山岩盖层,两者之间大量地层缺失,火山岩系与基底变质岩呈喷发不整合或断层接触。矿区出露的地层为上侏罗统磨石山群第一至第三岩性段的酸性火山碎屑岩。矿体产于上侏罗统磨石山群的酸性火山凝灰岩中,近矿岩石多发生蚀变作用,主要有硅化、黄铁矿化、绿泥石化、绢云母化、次生石英岩化、黄铁绢英岩化和泥化。其中硅化、黄铁矿化与金银矿化关系密切。

矿区断裂构造较发育,主要有上田一下田-黄宝舒东西向断裂带,宅下一弄坑北东向断裂带;新塘一直坑、治岭头一天堂近南北向断裂带和牛头山环状断裂系。其中北东向断裂及其伴生构造控制了本区金银矿化的分布。矿区金银矿化具有两期四阶段的特点,矿石的矿物组合为:黄铁矿-辉银矿-碲银矿-自然银-金银矿-冰长石-石英-方解石-萤石等。

前人对区域上的产于火山岩区的金银矿床如金鸡岩小型金矿^[1]、遂昌治岭头金矿床^[2]的成因矿物

学特征作了较深入的研究,但对该区黄铁矿仅进行过一些初步探讨,对其成因标型及找矿标型特征更缺乏深入研究,故无法利用矿物标型特征对该区金银矿化特征进行成因分析,更难以对该区金银矿化的深部远景作出进一步的评价。因此,作者通过对浙江武义弄坑金银矿区黄铁矿的成分标型特征研究,提取了大量的成因及找矿信息,为该矿区矿化成因类型的确定提供了可靠性的矿物学依据,并探讨了矿区深部远景。

1 黄铁矿产状及形态

1.1 产状特征

本区黄铁矿共有三种产状,属三个世代的产物,分三个阶段形成,在本区成矿阶段中,除氧化期外,均有黄铁矿的生成。第一世代(Py-I)呈星散浸染状产出于蚀变岩石中;第二世代(Py-II),与石英呈脉状产出;第三世代(Py-III)呈细脉状产出。各世代黄铁矿产出特征见表1所示。除第一世代外,二、三代黄铁矿产于矿化阶段,且金、银含量较高。

1.2 形态特征

黄铁矿的晶体形态主要有:1) {100} 晶体,即单一的立方体的晶形。2) {100} + {111} 的聚形晶体,

收稿日期:2004-08-04 收到,2005-06-21 改回

基金项目:国家重大基础研究发展规划资助项目(G1998040800);国家自然科学基金资助项目(40073012)

第一作者简介:周学武(1963—),男,副教授,博士生,从事成因矿物学研究。

表 1 弄坑金银矿化区黄铁矿的产状特征

Table 1 The characteristic to pyrite in the Longkeng mineralization district

世代	产状特征	晶形	颜色	粒度/mm	附注
Py I	呈星点状浸染分布于各种蚀变岩中及硅化透镜体中	以立方体为主	亮浅铜黄色	2	含金银性差
Py II	与石英组成石英-黄铁矿脉产于蚀变带的裂隙中	以不规则状为主,可有立方体、五角十二面体晶形	暗绿或银灰色调的浅铜黄色	1	含金银性好
Py III	呈黄铁矿细脉形式产于各种细裂隙中	不规则状	银灰色调的浅铜黄色	0.8	含金、银性中

即以立方体为主与八面体所组合的晶形。3) {100} + {210} 的聚形晶体,即以立方体为主与五角十二面体相聚合的晶形。4) {210} 晶体,即单一的五角十二面体的晶形。5) 不规则的形态,即晶体多破碎呈他形的形态。上述几类晶形中,立方体 {100} 黄铁矿占主要地位,少数五角十二面体的黄铁矿。

前人对黄铁矿的形态特征研究表明^[3-6],立方体 {100} 黄铁矿的形成深度相对较浅,立方体与八面体聚形的黄铁矿,当立方体所占晶面增大时,其形成温度相对较低;当八面体晶面增大时,则其形成温度相对较高。由此可判断,本区黄铁矿可能形成于低温浅成环境。

2 黄铁矿化学成分特征

本区黄铁矿单矿物化学全分析结果见表 2。由表 2 可知,弄坑矿化区黄铁矿与理论值相比,总体具亏硫特征,且富含砷和含少量的 Cu、Pb、Zn、Au、Ag、Co、Ni、Se、Te、Sb、Hg 等元素。这些微量元素的存在,除相似相容物质作用原理(类质同象替换)影响外,还与本区黄铁矿的形成环境有着密切关系。它们的种类和数量,以及它们之间的关系具有重要的成因和找矿评价意义^[6-12]。下面就从主要成分和微量元素两方面进行讨论。

2.1 主要成分(Fe、S、As)特征

2.1.1 $w(S)/w(Fe)$ 值 据文献报道^[6],沉积成因的黄铁矿主要化学组分铁和硫的含量与理论值相近或硫的含量略多 [$w(Fe) 46.16\%$, $w(S) 53.84\%$],内生黄铁矿型铜矿床,多金属矿床中的黄铁矿与标准值相比亏硫,与超基性岩有关的铜镍矿床中的黄铁矿铁和硫的含量与理论值相近。本区黄铁矿的 $w(S)/w(Fe)$ 值(亏硫特征)反映出它与内生热液作用成因相接近的特征。

2.1.2 $w(Fe)/w(S+As)$ 值 As 在金矿床中黄铁矿内的特高含量已被大多数资料所证实,这主要是

因为它不仅是热液中常见的挥发分,而且往往能以类质同象的形式替代 S 而进入黄铁矿晶格。前人研究表明,As 在黄铁矿中的含量及 $w(Fe)/w(S+As)$ 值具有很重要的标型性^[3]。表 3 列出了本矿化区黄铁矿成分标型特征值。

据 Новгородова^[7] 等的研究,黄铁矿中 $w(Fe)/w(S+As)$ 值与其形成深度有较好的相关性,相关系数为 0.878,表 4 列出了 $w(Fe)/w(S+As)$ 值与产出部位的关系。

从表 3 可以看出,本区黄铁矿的 $w(Fe)/w(S+As)$ 值为 0.863~0.926,平均为 0.882。据此,笔者推测,弄坑矿化区的黄铁矿形成于中偏浅成环境。

2.2 微量元素特征

2.2.1 Co、Ni、 $w(Co)/w(Ni)$ 值 由于 Co、Ni 与 Fe 同为 VIII 族元素,它们易于替代 Fe 而进入到黄铁矿晶格中,但对于不同成因类型矿床来说,黄铁矿中 Co 与 Ni 含量及其比值又各有差异。

理论研究^[8]表明,在岩浆结晶分异过程中,由于 Co、Ni 的八面体择位能不同(分别为 31.0 和 86.2 J/mol),Ni²⁺ 倾向富集于八面体配位,因此,Ni 集中于八面配位比例高的岩浆早期结晶形成的矿物中,而 Co 则在岩浆晚期形成的矿物中相对富集。这就使得岩浆热液的 $Co/Ni > 1$ 。所以来源于岩浆热液中析出的黄铁矿,其 $w(Co)/w(Ni)$ 值一般都大于 1。Co 的亲铁性大于 Ni(在周期表上:Co 的位置比 Ni 更靠近 Fe),Co 受热后较 Ni 易挥发。因此,受热液或火山作用影响的黄铁矿 Co 含量较高且 $w(Co)/w(Ni)$ 值明显大于 1。表生作用条件下,Ni 的迁移比 Co 大,导致陆源沉积物中黄铁矿富含 Ni,且 $w(Co)/w(Ni) < 1$ 。

表 5 列出了弄坑矿化区八件黄铁矿的 $w(Co)/w(Ni)$ 值及其与某些矿床黄铁矿 $w(Co)/w(Ni)$ 值的对比资料,说明本区矿化特征具有火山热液作用的成因性,且与浙江八宝山矿床成因相一致。

表 2 浙江武义弄坑金银矿化区黄铁矿成分特征

Table 2 The compositional characteristic of pyrite in the Longkeng mineralization district

序号	样号	取样位置	Fe W(B)(%)	S W(B)(%)	Ti W(B)(%)	Pb W(B)(%)	Co W(B)(%)	Cu W(B)(%)	Ni W(B)(%)	Zn W(B)(%)	Au W(B) (10 ⁻⁶)
1	P ₁₋₁ -2	平硐 1-M ₁ 矿	46.67	52.81	0.0020	0.0052	0.0026	0.0115	0.0010	0.0026	0.068
2	P ₁₋₁ -5	平硐 1-M ₁ 矿	46.38	53.04	0.0046	0.0053	0.0021	0.0023	0.0022	0.0022	0.212
3	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₃	平硐 1 中沿脉 2 西 3 号点	46.44	52.68	0.0046	0.0212	0.0022	0.0074	0.0021	0.0016	0.742
4	P ₁ Y ₂ E ₁ -Py ₂	平硐 1 中沿脉 2 东 1 号点	46.71	52.23	0.0050	0.0471	0.0029	0.020	0.0022	0.0029	0.19
5	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₁	平硐 1 中沿脉 2 西 3 号点	46.68	51.33	0.0035	0.016	0.0029	0.0045	0.0017	0.0027	0.17
6	Y ₁ C ₁ -PyQ ₁	沿硐 1 与穿脉 1 交叉口	47.42	52.36	0.0034	0.053	0.0040	0.0053	0.0040	0.0030	0.18
7	Y ₁ C ₃ -PyQ ₁₁	沿硐 1 与穿脉 3 交叉口	46.9	51.83	0.0071	0.0053	0.0026	0.0044	0.0034	0.0014	0.13
8	P ₃ Y ₁ C ₂ -Py ₅	平硐 3 中沿脉 1 与穿脉 2 交叉口	46.60	51.70	0.0031	0	0.0030	0	0.0028	0.0018	0.095

序号	样号	取样位置	Ag W(B)(10 ⁻⁶)	As W(B)(10 ⁻⁶)	Sb W(B)(10 ⁻⁶)	Hg W(B)(10 ⁻⁶)	Se W(B)(10 ⁻⁶)	Te W(B)(10 ⁻⁶)	化学式
1	P ₁₋₁ -2	平硐 1-M ₁ 矿	157	4408.5	371.0	35.0	16	24.66	Fe(S _{1.9711} As _{0.0070})1.9781
2	P ₁₋₁ -5	平硐 1-M ₁ 矿	796.1	4165.7	357.1	29.7	11.3	—	Fe(S _{1.9721} As _{0.0067})1.9988
3	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₃	平硐 1 中沿脉 2 西 3 号点	980.7	1197.1	5985.7	287.3	12.0	8.2	Fe(S _{1.9711} As _{0.0070})1.9781
4	P ₁ Y ₂ E ₁ -Py ₂	平硐 1 中沿脉 2 东 1 号点	62.8	9121.5	536.6	26.8	18	—	Fe(S _{1.9476} As _{0.0146})1.9624
5	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₁	平硐 1 中沿脉 2 西 3 号点	574.2	13941.3	4647.4	425.3	9.4	—	Fe(S _{1.9155} As _{0.0223})1.9378
6	Y ₁ C ₁ -PyQ ₁	沿硐 1 与穿脉 1 交叉口	42.2	1316.2	101.3	69.6	13	—	Fe(S _{1.9231} As _{0.0021})1.9255
7	Y ₁ C ₃ -PyQ ₁₄	沿硐 1 与穿脉 3 交叉口	31.6	11993.8	403.6	4.3	12.0	—	Fe(S _{1.9251} As _{0.0191})1.9442
8	P ₃ Y ₁ C ₂ -Py ₅	平硐 3 中沿脉 1 与穿脉 2 交叉口	116.0	12634	3389	689.5	9.6	—	Fe(S _{1.9326} As _{0.0202})1.9528

测试者:中国地质大学(武汉)应用化学系中心实验室

表 3 浙江武义弄坑金银矿化区黄铁矿成分标型特征值

Table 3 The typomorphic characteristic of pyrite composition in the Longkeng district

序号	样号	w(Fe)/ w(S+As)	w(S)/w(Se) (×10 ⁴)	w(Se)/ w(Te)	w(Co) /w(Ni)	w(Au)/w(Ag) (×10 ⁴)	w(Ag) /w(Au)
1	P ₁₋₁ -2	0.876	33.0	0.065	2.6	4.3	2309
2	P ₁₋₁ -5	0.868	46.9	—	0.95	2.7	3755
3	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₃	0.880	43.9	0.375	1.05	7.6	1322
4	P ₁ Y ₂ E ₁ -Py ₂	0.879	29.0	—	1.32	30.3	331
5	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₁	0.885	54.6	—	1.71	3.0	3378
6	Y ₁ C ₁ -PyQ ₁	0.903	40.3	—	1	42.7	234
7	Y ₁ C ₃ -PyQ ₁₄	0.884	4.32	—	0.76	41.1	243
8	P ₃ Y ₁ C ₂ -Py ₅	0.880	53.9	—	1.07	8.2	1221

序号	样号	w(Ag) /w(Pb)	w(Ag) /w(Zn)	w(Cu)/ w(Zn)	w(Pb)/ w(Ni)	w(Co+Ni)/ w(Pb+Zn)
1	P ₁₋₁ -2	3.02	6.04	4.4	5.2	0.4615
2	P ₁₋₁ -5	15.02	36.19	1.05	2.4	0.5733
3	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₃	4.63	61.3	4.6	10.1	0.1886
4	P ₁ Y ₂ E ₁ -Py ₂	0.13	2.2	6.9	21.4	0.102
5	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₁	3.59	21.3	1.7	9.4	0.2460
6	Y ₁ C ₁ -PyQ ₁	0.08	1.4	1.8	13.3	0.1429
7	Y ₁ C ₃ -PyQ ₁₄	0.60	2.3	3.1	1.6	0.8955
8	P ₃ Y ₁ C ₂ -Py ₅	∞	6.4	0	0	3.222

表 4 黄铁矿 $w(\text{Fe})/w(\text{S} + \text{As})$ 值与其产出部位的关系

Table 4 The $w(\text{Fe})/w(\text{S} + \text{As})$ ratio of pyrite with different occurrences

产地	产出部位	矿石类型	Fe[(W(B))](%) (平均值)	As[(W(B))](%) (平均值)	S[(W(B))](%) (平均值)	$w(\text{Fe})/w(\text{S} + \text{As})$	样品数(个)
前苏联	深	石英脉型	45.615	1.55	52.35	0.846	2
	中	细脉浸染型	45.72	1.28	51.68	0.863	1
	浅	石英脉型	46.565	0.505	49.775	0.926	2
本矿区		石英-黄铁矿脉型	46.73	0.735	52.25	0.882	8

表 5 黄铁矿的 Co、Ni 含量及其比值

Table 5 The Co, Ni contents and their ratios of pyrite

矿床及样号	Co 含量[W(B) (10^{-6})]	Ni 含量[W(B) (10^{-6})]	$w(\text{Co})/w(\text{Ni})$	资料来源	
弄坑矿化区	P ₁ -2	26	10	2.6	本课题组
	P ₁ -5	21	22	0.95	
	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₃	22	21	1.05	
	P ₁ Y ₂ E ₁ Py ₂	29	22	1.32	
	P ₁ Y ₂ W ₃ PyQ ₁	29	17	1.71	
	Y ₁ C ₁ -PyQ ₁	40	40	1	
	Y ₁ C ₃ -PyQ ₁₁	26	34	0.76	
P ₃ Y ₁ C ₂ Py ₃	30	28	1.07		
陕西二台子卡林型金矿床			0.55	文献[6]	
川西北东北寨卡林型金矿床			0.41	文献[10]	
宁夏复金场子沉积-热卤水改造型金矿床			0.56	文献[6]	
贵州板其渗滤热卤水热液型金矿床			0.41	文献[6]	
浙江银坑山火山热液型金银矿床			2.13	文献[6]	
浙江八宝山火山热液型金银矿床			1.43	文献[6]	
河北平原次生火山型金矿床			1.48	文献[6]	
豫西超浅成火山斑岩型金矿床			4.52	文献[6]	
湖南七宝山接触交代型金矿床			9.08	文献[6]	
甘肃白银厂黄铁矿型金铜矿床			2.48	文献[6]	
辽宁五龙岩浆热液型金矿床			1.14	文献[8]	

此外,黄铁矿中的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值还可用于评价矿化强度^[9],并可以作为圈定金银矿体的一个辅助指标。一般内生热液成因的金(或金银)矿床,矿体中黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值大于近矿晕中黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值。如弄坑矿化区,矿化强度较大的部位(矿体中),黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值(大于1)大于矿化强度较弱地段(近矿晕中)黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值(小于1)(表6)。

2.2.2 Se、Te 及 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 、 $w(\text{Se})/w(\text{Te})$ 值
Se、Te 往往类质同象替换 S 而进入黄铁矿晶格中,它们的存在及其含量也具有标型意义。据文献报道^[6],沉积型黄铁矿大多数含 Se $0.5 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$,

表 6 矿体与近矿晕中黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值

Table 6 The $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ ratio of the pyrite in ore body and its vicinity

矿床	矿床	$w(\text{Co})/w(\text{Ni})$
本区	矿体中(强矿化部位)	1~2.6(1.46)
	近矿晕(弱矿化部位)	0.76~0.95(0.85)
浙江火山岩型金矿床	金银矿石中	2.99
	铅锌矿石中	0.82
	硫铁矿石中	0.82
	银坑山成矿期	4.85
	银坑山成矿后	0.74, 0.80(0.77)
	八宝山成矿期	2.84
八宝山成矿后	0.56, 0.90(0.73)	

注:括号内数字为均值,本区数据来源于本课题组,浙江火山岩金矿床数据来源于文献[6]

$w(S)/w(Se)$ 值多在 25000~500000,热液矿床中大多数黄铁矿含 Se $20 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$, $w(S)/w(Se)$ 值多在 10000~27000;Te 在内生成矿作用过程中随着温度的降低而在黄铁矿中含量升高,中温

热液多金属矿床黄铁矿的 $w(Se)/w(Te)$ 值为 0.2, 低温热液成因黄铁矿的 $w(Se)/w(Te)$ 则多小于此值,本区黄铁矿中的 Se、Te 含量及 $w(S)/w(Se)$ 、 $w(Se)/w(Te)$ 值见表 7 所示。

表 7 弄坑矿化区黄铁矿中 S、Se、Te 含量及其比值

Table 7 The S, Se, Te contents and their ratios in the pyrite in the Longkeng district

特征值样品	S(%)	Se(%)	Te(%)	$w(S)/w(Se)(\times 10^4)$	$w(Se)/w(Te)$
P ₁₋₁ -2	52.81	0.0016	0.0246	3.3	0.065
P ₁₋₁ -5	53.04	0.00113	—	4.7	—
P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₃	52.68	0.0012	0.0082	4.4	0.146
P ₁ Y ₂ E ₁ -Py ₂	52.23	0.0018	—	2.9	—
P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₁	51.33	0.00094	—	5.5	—
Y ₁ C ₁ -PyQ ₁	52.36	0.0013	—	4.0	—
Y ₁ C ₃ -PyQ ₁₁	51.83	0.0012	—	4.3	—
P ₃ Y ₁ C ₂ -Py ₇	51.7	0.00096	—	5.4	—

上述研究表明:①弄坑矿化区黄铁矿的 $w(S)/w(Se)$ 值基本属于热液成因(为 29000~55000,远小于 250000);②所测 2 个样品中黄铁矿的 $w(Se)/w(Te)$ 值分别为 0.065 和 0.146,小于 0.2,属于低温热液作用成因。

2.2.3 $n(Au)/n(Ag)$ 值 近年来的研究表明,黄铁矿中的化学参数 $n(Au)/n(Ag)$ 值(原子数比)与样品产生的深度有一定的相关性,黄铁矿的 $n(Au)/n(Ag)$ 值与高程(H)为反相关关系,相关系数为 -0.984 52,相关公式为:

$$H_{(m)} = 1345.75 - 136.387[n(Au)/n(Ag)]^{[11]}$$

与样品产生的位置的深度级别(D)呈正相关,相关系数 0.963 07,相关公式为:

$$D = 0.652 + 0.266[n(Au)/n(Ag)].$$

式中:D 为样品位置的深度级别,浅部的 D 规定等于或小于 1,中部为 2 左右,深部为 3^[7]。

依据所测黄铁矿样品中 $n(Au)/n(Ag)$ 值和深度级别公式,可算出各样品所采位置的深度级别(D)(表 8)。

表 8 本区黄铁矿样品的 Au/Ag 值及其深度级别特征

Table 8 The Au/Ag ratio of the pyrite and its depth in the Longkeng district

样号	$n(Au)/n(Ag)$	D
P ₁₋₁ -2	2.37×10^{-1}	0.6521
P ₁₋₁ -5	1.46×10^{-1}	0.6520
P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₃	4.14×10^{-1}	0.6521
P ₁ Y ₂ E ₁ -Py ₂	16.57×10^{-1}	0.6524
P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₁	1.62×10^{-1}	0.6520
Y ₁ C ₁ -PyQ ₁	23.36×10^{-1}	0.6526
Y ₁ C ₃ -PyQ ₁₁	22.53×10^{-1}	0.6526
P ₃ Y ₁ C ₂ -Py ₇	4.49×10^{-1}	0.6521

由表 8 可知,本区所测黄铁矿样品产出位置的深度级别 D 值为 0.6520~0.6526,小于 1,说明所采样品的位置在浅部,即目前矿化区工程控制地段仍处于浅部地段。

2.3 同位素特征

2.3.1 硫同位素特征 各种硫化物的形成条件可由硫同位素组成的变化反映出来,即如果矿物在形成以后,没有受到任何地质作用的叠加改造,矿物的硫同位素组成通常不发生新的变化。从这个意义上说,硫同位素是一个很好的示踪剂,研究金银矿床的矿质来源就是利用硫同位素的这种示踪效应。

据王义文^[13]统计,与中-酸性小侵人体与次火山岩、火山岩有关的金矿床硫同位素组成具典型岩浆硫的特点。矿石硫同位素组成(按 17 个矿床) $\delta^{34}S, X = 1.1 \sim 4.6, \delta^{34}S$ 变化范围小于 10‰ (-1.3‰ ~ 7.5‰),极差均小于 5‰,标准差小于 1‰,矿石硫与母岩硫同位素组成一致,而与周围地层无关。

表 9 列出了弄坑矿化区矿石中黄铁矿硫同位素组成特征,由表 9 可知,本区硫同位素组成变化范围为 0.9‰~6.28‰,极差为 5.38‰,平均 4.06‰,标准差为 1.3‰,具有变化范围窄,极差小,离散度小特征(图 1),并具极好的塔式效应(图 1)。这表明本区热液中硫系岩浆硫源的成因所至,从图 2 也可以看出,本区硫同位素的分布特征与岩浆硫、陨硫石的分布相一致。

表 9 同时给了国内外一些典型成因的金矿床硫同位素组成的特征数据,由此不难得到这样的结论:

表 9 国内外某些金矿床硫同位素组成特征

Table 9 The S-isotope composition al characteristics in some gold deposits

成因类型	矿区	样品数	变化范围	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$ 平均值	偏差 $R(\text{‰})$	标准差 δ	资料来源
岩浆 (火山)	江苏宁芜北段	10	+1.9~+7.5	+5.06	5.6	1.96	文献[6]
	辽宁五龙	4.0	+0.9~+3.5	+2.0	2.6		文献[6]
热液 成因	山东玲珑	85	+4.9~+8.5	+6.7	3.6	1.4	文献[8]
	浙江治岭头	67	+0.33~+7.44	+4.95	7.11	1.62	文献[6]
变质	吉林治夹皮沟	10	+3.6~+8.2	+5.9	4.6	1.6	文献[8]
	三道沟	43	+1.5~+9.0	+5.2	7.5	2.0	文献[8]
热液 成因	三道沟	65	+2.3~+11.9	+6.0	9.6	1.2	文献[8]
	河北金厂峪	24	-5.1~+3.2	-3.1	8.2	1.4	文献[6]
金矿	湖南沃溪	17	-4.0~+2.2	-2.2	6.2	1.6	文献[6]
	三道甸子	53	-8.3~+1.2	-4.5	7.1	1.5	文献[8]
热卤	美国 卡林	12	+4.2~+16.1	+10.64	11.9	4.07	文献[6]
水成	宁夏金场子	11	-6.8~+16.3	+7.5	23.1	6.35	文献[6]
因金矿	陕西二台子	28	+3.9~+27.1	-111.1	23.2	6.09	文献[6]
	川西北东北寨	15	-14.59~+6.3	-3.35	20.89	5.55	文献[14]
	本矿区	22	+0.9~+6.28	+4.06	5.38	1.33	本文

分析者:宜昌地质矿产所同位素地质研究室

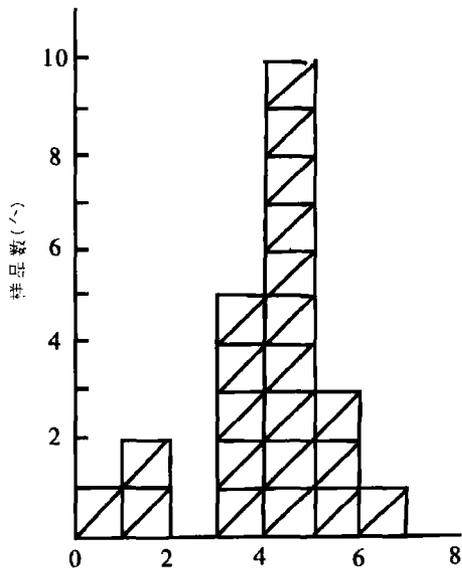


图 1 弄坑矿区黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 组成柱式图解
Fig. 1 The histogram of $\delta^{34}\text{S}$ composition of the pyrite in the Longkeng district

1) 渗滤热卤水热液成因的金矿床,其硫同位素组成具有极差,标准差都大,变化范围宽,离散度大的特征;2) 变质热液成因的金矿床中矿石硫的同位素组成具有极差、标准差中等,变化范围较宽,表现出远离陨石硫特征;3) 岩浆(火山)热液成因金矿床的硫

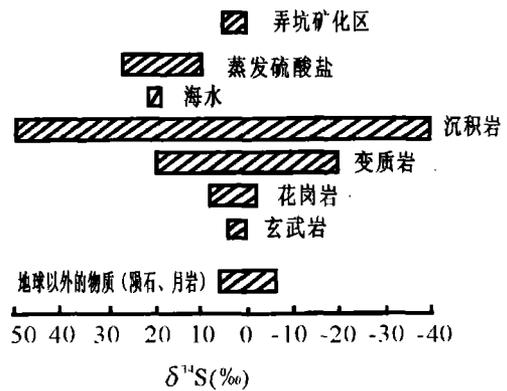


图 2 一些天然含硫物质中硫同位素的分布(据王义文,1983)
Fig. 2 The distributing chart of S-isotopes of some native sulf-substance(after Wang,1983)

同位素组成具有极差、标准差小,变化范围狭窄,离散度小,具陨石硫的特征;4) 本区硫同位素组成与岩浆热液成因金矿床的硫同位素组成相吻合,并且与浙江治岭头金矿床硫同位素组成特征极为一致。

总之,本区的硫源系岩浆硫,并随火山热液作于迁移、沉淀、生成黄铁矿等硫化物。

2.3.2 铅同位素特征 我们对本区主要金属矿物黄铁矿进行了微量铅的同位素分析,其结果表 10。

表 10 弄坑矿化区铅同位素组成特征

Table 10 The Pb-isotope composition al characteristics in the Longkeng district

样号	矿物	位置	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	斯坦西模式年龄/Ma	资料来源
Y ₁ C ₁ -PyQ ₁	黄铁矿	YD ₁ -CD ₁	39.25	15.79	18.16	34	
P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₃	黄铁矿	PD ₁ -YD ₂ W-CD ₃	38.85	15.65	18.01	26	本文
P ₃ Y ₁ C ₂ Py ₃	黄铁矿	PD ₃ -YD ₁ W-CD ₂	38.44	15.48	17.86	19	
上地壳			39.08	15.73	19.35		
下地壳			38.57	15.29	17.27		文献[15]
造山带			38.03	15.62	18.86		
地幔			37.70	15.42	18.10		

分析者:宜昌地质矿产所同位素地质研究室

由表 10 可知,本区铅同位素组成特征与壳源铅同位素特征相一致,且 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值高(39.25~38.44),这不同于幔源铅同位素组成,换言之,本区金银矿化与深源岩浆岩无关,而系地层中热液成矿的结果。

此外,该资料还表明,本区铅同位素组成稳定,变化微弱,将其投影在正常铅 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (A)和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (B)座标图(图 3)上,均属正常铅。据此,我们算出其斯坦西模式年龄分别为 34 Ma、26 Ma 和 19 Ma,此值与矿化体围岩地层时代是一致的。

从本区铅同位素组成与相应的模式年龄来看,矿石铅源于围岩。

3 黄铁矿成分标型信息

3.1 黄铁矿的成分成因标型分析

我们已经讨论了弄坑矿化区矿石中黄铁矿的成分一些特征,下面我们将进一步通过对比分析,来探讨本区黄铁矿的成分成因标型。

3.1.1 成因类型信息

I. 本区黄铁矿的 $w(\text{S})/w(\text{Fe})$ 值(亏硫特征)反映出它与内生热液作用成因相接近的特征。

II. 本区黄铁矿 $w(\text{Fe})/w(\text{S}+\text{As})$ 值表明其形成于中偏浅成环境。

III. 本区 8 件黄铁矿中 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值平均值为 1.34, 这说明了本区矿化特征具有火山热液作用的成因性,且与浙江八宝山床成因相一致。

IV. 本区 8 件黄件矿样品平均含硒 12.7×10^{-6} , 与热液矿床中黄铁矿的标型数值($2 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$)一致,而与沉积矿床中黄铁矿的含硒量($0.5 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$)不符。

V. 本区 8 件黄铁矿样品的 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 平均 43000, 超出沉积矿床 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 值的标型范围(107000~267000)而处于热液矿床的标型范围(267000~11000)。

VI. 本区 2 件黄铁矿样品 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 平均值为 0.11, 与中温热液矿床的标型数值(0.2)相近。

VII. 本区 8 件黄铁矿样品中 $w(\text{Cu})/w(\text{Zn})$ 、 $w(\text{Ag})/w(\text{Zn})$ 、 $w(\text{Pb})/w(\text{Ni})$ 值平均分别为 2.9、17.1 和 7.9, 都与变质矿床的标型数值 [$w(\text{Cu})/w(\text{Zn})$ 为 0.2~0.3, $w(\text{Ag})/w(\text{Zn})$ 为 0.005~0.08, $w(\text{Pb})/w(\text{Ni})$ 为 0.02~0.14] 不符。

3.1.2 成矿物质来源信息 矿化区矿石中黄铁矿硫同位素组成特征表明,本区热液中硫系岩浆硫源

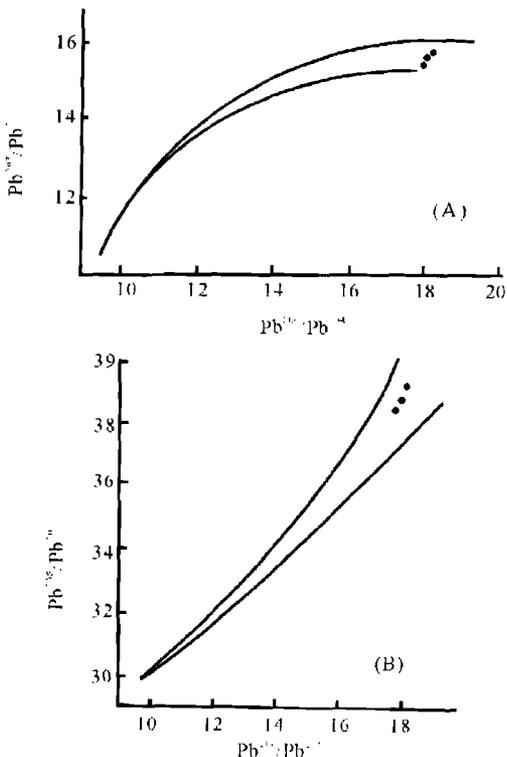


图 3 正常铅的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (A) 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (B) 坐标图(据宜昌所^[15])

Fig. 3 The diagram of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (A) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (B)

的成因所至,从图 2 也可以看出,本区硫同位素的分布特征与岩浆硫,陨硫硫的分布相一致。

本区铅同位素组成与相应的模式年龄表明矿石铅源于围岩。

综上所述,我们认为,本区矿化属于浅成低温火山热液成因,并且有多期多阶段的矿化特征,成矿物质来源于围岩。

3.2 找矿标型信息

3.2.1 找矿标志信息 呈脉状产出,不规则状或五角十二面体与立方体聚形晶、暗绿或银灰色调的浅铜黄色,粒度为 0.8~1 mm 黄铁矿是金银矿化的重要标志。尤其是 $w(\text{Co})/w(\text{Ni}) > 1$ 的黄铁矿是矿化较强的地段。

3.2.2 远景预测评价信息 在矿体的不同部位分布的同一种矿物在化学成分上有自己独特的特点,因此,可以分析所研究样品(矿化露头或一定深度的标本)处于矿体的何种部位(如矿体上部、矿体中部、矿体下部),借之评价矿床深部的远景。

金矿床矿上晕和矿体上部之黄铁矿含 Ba、Hg、

Ag、Sb、As 较多,矿体中部之黄铁矿显著富集 Au、Cu、Pb、Zn、Bi,矿体下部及根部之黄铁矿含 Co、Ni、Ti、Cr 较多^[16]。据此,笔者将本区黄铁矿中的微量元素分为三组: $A = w(\text{As} + \text{Sb} + \text{Hg} + \text{Ag})$, $B = w(\text{Au} + \text{Cu} + \text{Pb} + \text{Zn} + \text{Bi})$, $C = w(\text{Co} + \text{Ni} + \text{Ti})$,其特征值见表 11。并以 A、B、C 为三个端员,作等边三角形图△ABC(图 4)。将黄铁矿投点到该三角图内,若投点靠 A 端,则表示此黄铁矿的成分组成中 A 组元素占优势,说明此黄铁矿系采于矿上部;若投点靠近 B 端,则表示此黄铁矿的成分组成中 B 组元素占优势,表明此黄铁矿处于矿中部;若投点靠近 C 端附近,则表示此黄铁矿的成分组成中 C 组元素占优势,表示此黄铁矿处于矿下部。图 4 中,8 件黄铁矿的投点除点 6(样号为 Y₁C₁-PyQ₁)稍远离 A 端外,其余各点均位于 A 端,这说明本区黄铁矿系采于矿化体的上部地段。

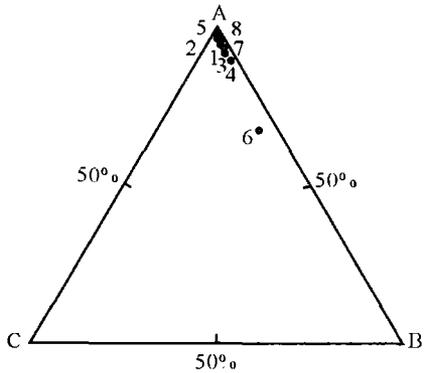
此外,本区黄铁矿中的化学参数 Au/Ag 值也表明目前本区工程控制地段仍处于浅部地段。

表 11 浙江武义弄坑火山岩区金银矿化区黄铁矿成分找矿标型特征值

Table 11 The composition prospecting typomorphic characteristics of the pyrite in the Longkeng deposit, Wuyi, Zhejiang

序号	样号	$A = w(\text{As} + \text{Sb} + \text{Hg} + \text{Ag}) [W(B)(10^{-6})]$	$B = w(\text{Au} + \text{Cu} + \text{Pb} + \text{Zn}) [(W(B)(10^{-6})]$	$C = w(\text{Co} + \text{Ni} + \text{Ti}) [(W(B)(10^{-6})]$	$D = A + B + C [(W(B)(10^{-6})]$
1	P ₁₋₁ -2	4971.5	193.068	56	5520.68
2	P ₁₋₁ -5	5348.6	98.212	89	5535.812
3	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₃	8450.8	302.742	89	8842.542
4	P ₁ Y ₂ E ₁ -Py ₂	9747.7	1002.19	101	10850.89
5	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₁	19588.2	232.17	81	19901.37
6	Y ₁ C ₁ -PyQ ₁	1529.3	613.18	114	2256.48
7	Y ₁ C ₃ -PyQ ₁₁	12433.3	111.13	131	12675.43
8	P ₃ Y ₁ C ₂ -Py ₅	16828.5	18.095	89	16935.595

序号	样号	A/D(%)	B/D(%)	C/D(%)	A/B	B/C	A/C
1	P ₁₋₁ -2	95.23	3.70	1.07	25.75	3.45	88.78
2	P ₁₋₁ -5	96.62	1.77	1.61	54.46	1.10	60.10
3	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₃	95.57	3.42	1.01	27.91	3.40	94.95
4	P ₁ Y ₂ E ₁ -Py ₂	89.83	9.24	0.93	9.73	9.92	96.51
5	P ₁ Y ₂ W ₃ -PyQ ₁	98.42	1.17	0.40	84.37	2.87	24.83
6	Y ₁ C ₁ -PyQ ₁	67.78	27.17	5.05	2.49	5.38	13.41
7	Y ₁ C ₃ -PyQ ₁₁	98.09	0.88	1.03	111.88	0.85	94.91
8	P ₃ Y ₁ C ₂ -Py ₅	99.37	0.11	0.52	930.01	0.20	189.08



A = As + Sb + Hg + Ag,

B = Au + Cu + Pb + Zn, C = Co + Ni + Ti

图4 黄铁矿成分特征三角图

Fig. 4 The compositional trigonal illustration of pyrite

4 结论

(1)呈脉状产出,不规则状或五角十二面体与立方体聚形晶、暗绿或银灰色调的浅铜黄色,粒度为0.8~1 mm 黄铁矿是金银矿化的重要标志。尤其是 $w(\text{Co})/w(\text{Ni}) > 1$ 的黄铁矿是矿化较强的地段。

2)黄铁矿成分成因标型特征研究说明,弄坑金银矿化属浅成低温火山热液成因类型,成矿物质来源于围岩及岩浆热液,其成矿特点可与浙江八宝山金银矿床相比。

(3)黄铁矿成分找矿标型特征表明,矿化区目前工程控制部位仍处于金银矿化体的上部地段,亦即在本区深部地段可望找到较富的金银矿化体。

参考文献 (References):

[1] 杜杨松,江云华,叶桂顺. 浙江金鸡岩金矿床中金银矿与黄铁矿的成因矿物学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 1998, 12(2): 214-221.
Du Yangsong, Jiang Yunhua, Ye Guishun. Genetic mineralogical features of the electrum and pyrite in the Jinjiyan gold deposit, Zhejiang Province and their geologic significance [J]. Geoscience, 1998, 12(2): 214-221. (in Chinese with English abstract)

[2] 梅建明. 浙江遂昌冶岭头金矿床黄铁矿的化学成分标型研究[J]. 现代地质, 2000, 14(1): 51-55.
Mei Jianming. Chemical typomorphic characteristic of pyrites from Zhilingtou gold deposit, Suichang, Zhejiang [J]. Geoscience, 2000, 14(1): 51-55. (in Chinese with English abstract)

[3] Смирнова С К и др. Применение типоморфных особенностей минералов для прогнознй оценки золотых рудопроявлений

Восточного Узбекистана и определения уровня их эрозийного среза, В К Н, Новые идеи в генетической минералогии [M]. Москва: Наука, 1983. 108-113.

[4] 陈光远, 孙岱生, 张立, 邵伟. 黄铁矿成因形态学[J]. 现代地质, 1987, 1(1): 60-76.
Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Zhang Li, Shao Wei. Genetic morphology of pyrite [J]. Geoscience, 1987, 1(1): 60-76. (in Chinese with English abstract)

[5] 李胜荣, 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 胶东乳山金矿黄铁矿形态研究[J]. 地质找矿论丛, 1994, 9(1): 79-86.
Li Shengrong, Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng. Study on morphology of pyrite from Rushan gold mines, Jiaodong region [J]. Geological Prospecting Forum, 1994, 9(1): 79-86. (in Chinese)

[6] 邵洁涟. 金矿找矿矿物学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988.
Shao Jielian. Prospecting mineralogy of gold deposit [M]. Wuhan: The Publishing House of China University of Geosciences, 1988. (in Chinese)

[7] Новгородова М И и др. Использование типоморфизма минералов и минеральных ассоциаций при минералогическом картировании полиформации Ных месторождений, В сб. Типоморфизм минералов и минеральных ассоциаций [M]. Москва: Наука. 88-95. 1986.

[8] 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.
Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Hui'an. Genetic mineralogy and prospecting mineralogy [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988. (in Chinese)

[9] 李胜荣, 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 胶东乳山金矿青顶矿区黄铁矿化学成分研究[J]. 黄金科学技术, 1994, 2(6): 8-12.
Li Shenrong, Chen Guangyuan, Shao Wei, Sun Daisheng. Study on chemical typomorphic characteristic of pyrites from Rushan Jinqingding gold mines, Jiaodong region [J]. Gold Science and Technology, 2(6): 8-12. (in Chinese)

[10] 周学武, 邵洁涟, 边秋娟. 四川东北寨金矿床黄铁矿标型特征研究[J]. 地球科学, 1994, 19(1): 52-59.
Zhou Xuewu, Shao Jielian, Bian Qiujian. Study on typomorphic characteristics of pyrite from Dongbeizhai gold deposit, Sichuan Province [J]. Earth Science, 1994, 19(1): 52-59. (in Chinese with English abstract)

[11] 薛君治. 成因矿物学教程 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990.
Xie Junzhi. Genetic mineralogy tutorial [M]. Wuhan: The Publishing House of China University of Geosciences, 1990. (in Chinese)

[12] 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体性质的指示 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(1): 1-4.
Bi Xianwu, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, Wu Kaixing. REE and HFSE geochemical characteristics of pyrites in Yao'an

- gold deposit: Tracing ore forming fluid signatures[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, 23 (1): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王义文. 中国金矿床稳定同位素特征及其研究意义[J]. *黄金*, 1985, (6): 7-14.
Wang Yiwen. Steady isotopes characteristics and their study significance in Chinese gold deposits[J]. *Gold*, 1985, (6): 7-14. (in Chinese)
- [14] 周学武. 四川松潘东北寨金矿床找矿矿物学研究[D]. 武汉: 中国地质大学地学院, 1988.
Zhou Xuewu. Study on prospecting mineralogy of gold deposit from Dongbeizhai, Songpan in Sichuan Province, China [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1988. (in Chinese)
- [15] 地质部宜昌所同位素地质研究室. 铅同位素地质研究的基本问题[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
Isotope Geologic Laboratory of Yichang Graduate School in Geological Ministry. The basic problem of geological study on lead isotope [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979. (in Chinese)
- [16] Boyle R W. The geochemistry of gold and its deposits[M]. *Geological Survey Bulletin 280*. Canadian Government Publishing Centre, Hull, Quebec, Canada K2A. OS9. 1979.

Research on the Composition Typomorphism of Pyrite from Longkeng Gold-Silver Mineralization District in Wuyi, Zhejiang Province, China

ZHOU Xue-wu^{1,2}, LI Sheng-rong¹, LU Li², LIN Wei-bing²

1. Key Laboratory of Lithospheric Tectonics and Lithoprobng Technology, China University of Geosciences, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Geological Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Longkeng gold-silver mineralization district is located in Wuyi County, Zhejiang Province. In order to confirm the genesis of Longkeng gold-silver mineralization and its mineralization perspective of the depth in the ore district. The study method is the method of prospecting mineralogy in this paper. The results: The paper studied the composition and its ratios (S/Fe, Fe/(S+As), Co/Ni, S/Se, Se/Te, Au/Ag), lead isotope, sulfur isotope characteristics of the pyrite in Longkeng gold-silver mineralization district, analyzed the genesis and prospecting typomorphism of the pyrite composition in Longkeng, worked out a large amount of information on the genesis and prospecting potential, meanwhile, prognosticated mineralization perspective of the depth in the ore district by using the trigonal illustrate of the pyrite composition characteristic, which not only provided reliable mineralogical basis for the genesis of Longkeng gold-silver mineralization, but also gave efficient evadence for gold and silver prospecting in depth in the mineralization district. The conclusions: The authors consider that Longkeng gold-silver mineralization is of epithermal vocanogenic origin. It would be profitable in the ore prospecting in depth in Longkeng gold-silver mineralization district.

Key words: pyrite; composition typomorphism; gold-silver mineralization; Longkeng, Zhejiang