

甘肃李坝金矿围岩蚀变与金成矿关系

张汉成¹, 肖荣阁², 王京彬¹, 刘金辉³, 秦新龙⁴, 白云来⁵

(1. 北京矿产地质研究院, 北京 100012; 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 北京科技大学 机械学院, 北京 100083; 4. 有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007; 5. 中国石油勘探开发研究院 西北分院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 西秦岭地区是目前国内造山型和卡林型金矿找矿的热点地区之一, 已发现的甘肃李坝造山型金矿为超大型规模。以李坝金矿 6 号矿带为例, 系统地研究了其蚀变矿物组合、近矿围岩蚀变分带及相应的金矿化特征, 总结了矿床(带)的蚀变分带模式。该模式具典型的中心式环带结构, 可分为 3 个蚀变带, 由中心向外依次为黄铁绢英岩化带、绢云母化带和绿泥石化带。蚀变矿物组合分别为黄铁矿 + 绢云母 + 石英 + 毒砂 + 白云母 + 电气石 + 方解石、绢云母 + 绿泥石 + 石英 + 黄铁矿 + 黑云母及绿泥石 + 黑云母 + 绢云母 + 黄铁矿; 与这 3 个蚀变带相对应的是金的富集带、矿化带和无矿带。蚀变岩石物质组分迁移分析表明, 围岩蚀变及其分带是热水流体 岩石反应时岩石化学组分发生迁移的结果, 矿化伴随着蚀变发生, 且金矿化与黄铁矿化和浸染状硅化关系最为密切。

关键词: 李坝; 造山型金矿; 蚀变分带模式; 金矿化; 元素迁移; 围岩

中图分类号: P614; P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1000 - 8527(2009)03 - 0472 - 09

Wall Rock Alteration and Its Relations to Gold Mineralization of the Liba Gold Deposit, Gansu Province

ZHANG Han-cheng¹, XIAO Rong-ge², WANG Jing-bin¹, LIU Jin-hui³, QIN Xin-long⁴, BAI Yun-lai⁵

(1. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

4. Eastern China Geological and Mining Organization for Non-Ferrous Metals, Nanjing, Jiangsu 210007, China;

5. Northwest Geology Research Institute, PetroChina, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: Western Qinling orogenic belt is one of the hot spots for orogenic and Carlin-type gold deposits exploration in China, where a super large gold deposit called Liba has been found. After choosing the No. 6 ore belt of Liba gold deposit as a case for systemically studying alteration mineral association, host rock alteration zoning and gold mineralization features, the authors sum up the alteration zoning mode of this type of gold deposit. Typical concentric zonal structure can be distinguished clearly, which shows that three alteration zones from inner to outer are pyritization silicification-sericitization zone, sericitization zone and chloritization zone. The altered mineral assemblages in each zone are pyrite + sericite + quartz $\pm$ arsenopyrite $\pm$ muscovite $\pm$ tourmaline $\pm$ calcite, sericite + chlorite + quartz + pyrite $\pm$ biotite and chlorite + biotite $\pm$ sericite $\pm$ pyrite respectively, and corresponding to the three alteration zones which are Au enrichment zone, Au mineralization zone and no Au mineralization zone. Migration of elements in alteration rock shows that alterations of wall rock and its zoning are resulted by hydrothermal fluid and rock reaction; Au mineralization occurs accompanied with mineral alteration, and mineralization of Au has a close relation to pyrite mineralization and disseminated silicification.

Key words: Liba; orogenic-type gold deposit; alteration zoning mode; gold mineralization; element migration; wall rock

收稿日期: 2008-11-12; 改回日期: 2009-05-02; 责任编辑: 戚开静。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2001CB409806)。

作者简介: 张汉成, 男, 副研究员, 1969 年出生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事金属矿床勘查与矿床成因研究工作。Email: zhchjd2008@163.com。

西秦岭地区沉积岩容矿金矿床的勘查和研究工作始于 20 世纪 70 年代，首先在陕西太白县发现了双王金矿，80 年代中期又在甘肃礼县发现了李坝 5 号金矿带，随着微量金分析技术的突破和卡林型金矿概念的引入，李坝 6 号、赵沟、杜沟和王河等金矿带也相继被揭露出来。李坝金矿位于中川花岗岩基北侧约 2 km 处，柳森^[1]最初认为该矿床为岩浆热液成因，韦龙明和张复新等^[2-4]将其归入类卡林型金矿，毛景文等^[5-6]则将该矿床归入造山型金矿。值得指出的是，前人对李坝金矿围岩蚀变与金成矿关系未作专门研究，为此笔者选择李坝金矿具代表性的 6 号矿带，对其矿体产状、蚀变矿物组合和蚀变分带特征以及金矿化与蚀变的关系进行了系统研究，总结了其蚀变分带模式，详细分析了蚀变岩石物质组分迁移特征。在此基础上，将 6 号矿带与典型卡林型金矿的蚀变分带模式进行了对比，结果显示二者差异明显，李坝金矿矿化受构造控制，成矿流体温度较高，缺乏卡林型金矿的特征，即缺乏低温矿物雄黄或雌黄。

1 地质背景

李坝金矿地处西秦岭造山带东部，区域上为一向西翘起的复式向斜构造，核部由中石炭世地层组成，南北两翼由中泥盆世地层组成，含矿建造为晚古生代复理石建造(图 1)，张复新等^[3]认为西秦岭造山带内的金山、马泉、庞家河、八卦庙、双王等金矿床特征与之类似。

1.1 地层与岩性

李坝金矿所处区域内出露地层主要为泥盆系中—上统李坝群(D₂lb)、石炭系中统下加岭组(C₂x)及第四系(Q₄)。其中泥盆系中—上统李坝群为一套海相沉积碎屑岩，由上而下可划分为 4 个岩性组，即山台坝组、徐家坝组、贺家磨组和大山坝组，其中贺家磨组斑点状板岩为该组所特有，是李坝金矿的标志含矿层。

1.2 构造

区域上褶皱、断裂构造极为发育，特别是断裂构造，控制了区域内金矿床、矿(化)点的分布。其中马沟Ⅳ级背斜控制了 6 号矿床(带)的产出；F₁Ⅱ级断裂和 F₂—F₂₂等Ⅱ级或Ⅳ级断裂与李坝金矿密切相关。

1.3 岩浆岩

区域内印支期、燕山期岩浆活动强烈，形成

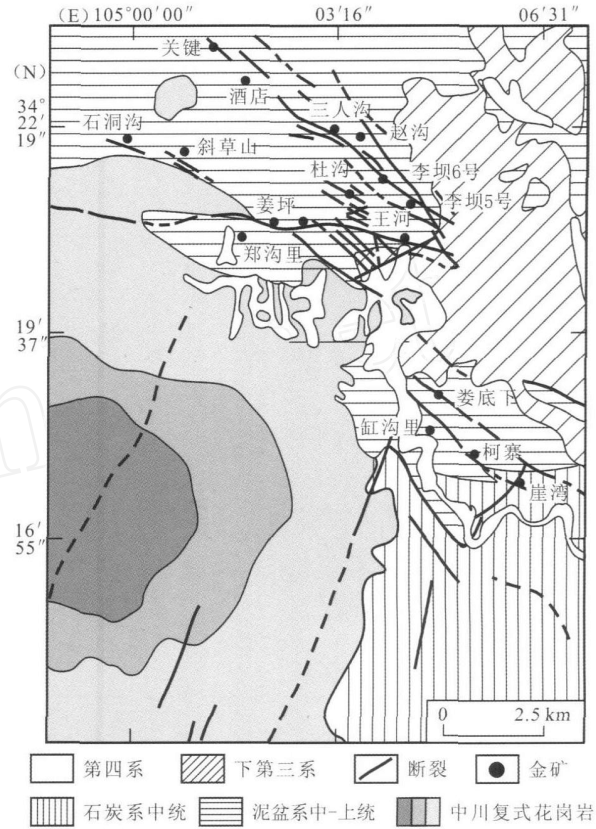


图 1 甘肃礼县李坝金矿区域地质图
Fig. 1 Regional geological map of the Liba gold deposit in Li County, Gansu Province

中生代早期中川复式花岗岩体。张姚代等和冯建忠等^[7-8]将岩浆活动划分为 3 期，分别形成了印支期中期(219 Ma)、印支期晚期(196 Ma)和燕山期早期(181.5 Ma)花岗岩，各时代岩体由外向内呈同心环状分布。

李坝金矿侵入岩岩脉较为发育，主要有煌斑岩脉、闪长(玢)岩脉等。岩脉延伸方向与矿区构造线方向基本一致，一些地段岩脉与金矿体相伴产出，但脉体本身并不含矿且与矿体界线明显，常可见切穿矿体现象，显然岩脉形成于金的主要成矿期之后。冯建忠^[9]测定了闪长(玢)岩脉的成岩年龄为 166.5 Ma，可见李坝金矿的主成矿期早于 166.5 Ma。

1.4 变质作用

李坝金矿区域变质作用较发育，泥盆系中—上统和石炭系中统沉积地层的变质程度达绿片岩相—角闪岩相，由北向南、由东向西变质程度逐渐增高。受印支期、燕山期岩浆活动影响，李坝金矿范围内热接触变质作用也十分发育，叠加于区域变质作用之上，使李坝群沉积碎屑岩变质程度加深。

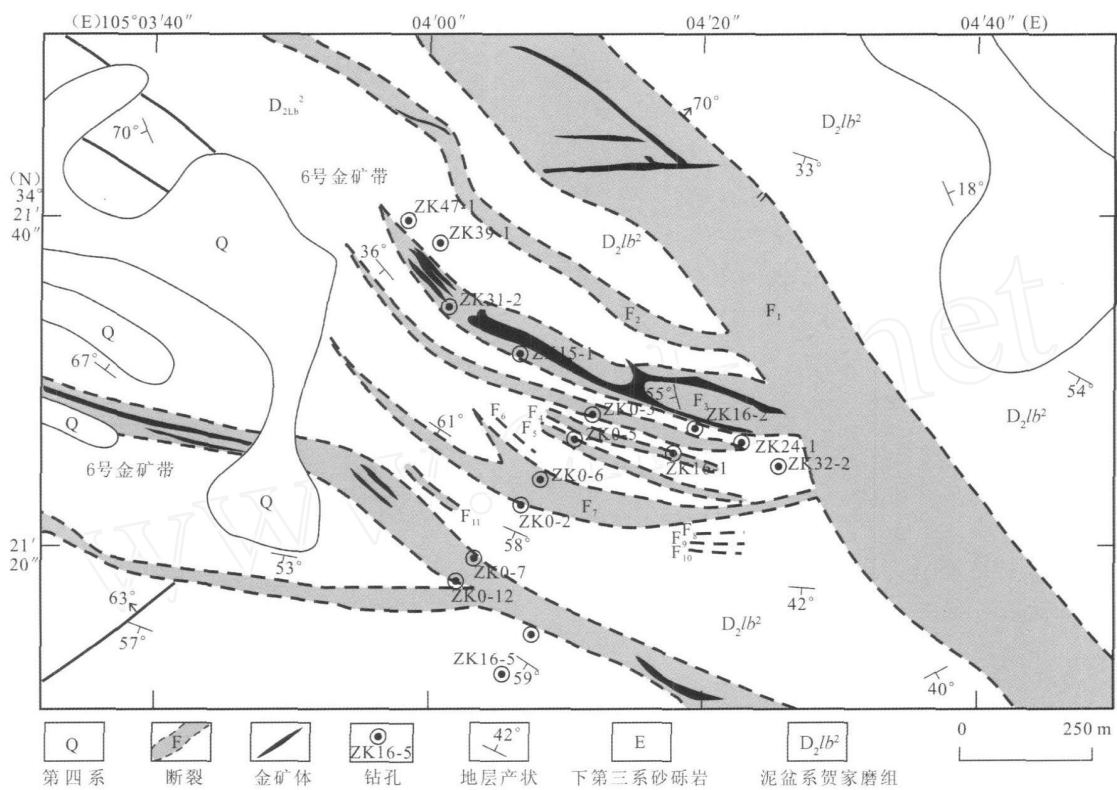


图 2 甘肃礼县李坝金矿 6号矿带地质图

Fig. 2 Geological map of No. 6 ore belt of the Liba gold deposit in Li County, Gansu Province

2 李坝金矿 6号矿带特征

2.1 空间展布

6号矿带是李坝金矿内的典型矿带，其总体走向 290°~310°，延长大于 2 000 m，宽约 500 m，矿带产状受马沟背斜及 F₃断裂破碎带控制(图 2)。该矿带由 67条矿体(品位大于 2.00 g/t)组成，其中规模较大的有 18条。

6号矿带的金矿体切穿泥盆系中—上统李坝群贺家磨组(D₂lb²)地层，矿体围岩均为斑点状粉砂质板岩，绢云绿泥石板岩和变质粉砂岩等，矿体与围岩无明显界线。金矿体常成群出现，大小不一，呈似层状、脉状和透镜状，具分支复合现象，品位和厚度变化较大。

2.2 矿石矿物化学成分

6号矿带矿石类型为金银系列矿物、黄铁矿、毒砂型，其主要矿物种类和特征见表 1。

矿石主元素分析结果见表 2。与上、下盘围岩比较，矿体中 Fe₂O₃和 K₂O含量明显偏高，FeO和 Na₂O则较低，w(Fe₂O₃)/w(FeO)、w(K₂O)/w(Na₂O)值也相对偏高。

矿石与近矿围岩微量元素统计结果表明 Au含

量与 As含量呈正相关(表 3)，金矿物存在于毒砂或砷黄铁矿中；卡林型金矿中通常富集的 Sb、Hg元素在 6号矿带无明显富集趋势。

表 1 李坝金矿床 6号矿带矿石主要矿物特征

Table 1 Mineral characteristics of ores in the No. 6 ore belt of the Liba gold deposit

矿物名称	含量 /%	粒度 /mm
黄铁矿	2.13 ±	0.013~1.950
毒砂	0.03 ±	0.037~0.148
方铅矿	0.01 ±	
闪锌矿	0.14 ±	0.016 3~0.052
黄铜矿	0.17 ±	0.060 ±
褐铁矿	4.35 ±	0.001 ±
白铁矿及钛铁矿	<0.5	0.05~0.10
黑钨矿	0.05 ±	
方解石	1.00 ±	0.049~0.096
白云石		<0.03
白云母及绢云母	50.00 ±	0.029~0.058
石英	34.14 ±	0.096~0.228
长石	3.10 ±	0.064~0.076
绿泥石	1.30 ±	0.009 ±
石墨及有机碳	0.39 ±	
其他	2.21 ±	

2.3 矿石结构与构造

矿石结构以自形、半自形及它形粒状结构为主，其次为包含嵌晶结构、交代残余结构、环带、鳞片变晶结构等，局部可见压碎、碎斑结构。矿石构造以浸染状、斑点状构造为主，其次为脉状、网脉状、条纹一条带状和角砾状构造等。

从李坝金矿产出地质构造背景、矿体空间产出特征、矿石矿物组合特征及冯建忠等^[8]、黄杰等^[10]、王相等^[11]、Goldfarb等^[12]和 Groves等^[13]的含金石英脉 Ar-Ar法、Rb-Sr法和 Pb-Pb法测年成果 (210~171.6 Ma)可以看出，李坝金矿是与碰撞造山运动有关的造山型金矿床。

3 蚀变矿物组合与分带

根据蚀变强度和蚀变矿物组合，由矿化中心到边缘，李坝金矿 6号矿带可分为 3个呈环带状分布

的蚀变带，即黄铁绢英岩化带、绢云母化带和绿泥石化带。各带蚀变矿物组合及蚀变特征见表 4。

黄铁绢英岩化带（I）：该带位于含矿断裂破碎带内部，形成富金矿体，表现为含矿碎屑岩因蚀变交代而形成黄铁矿 +石英 +绢云母 +碳酸盐斑点，交代强烈部位形成黄铁矿 +石英集合体 (图 3(a)、(b)、(c))。蚀变矿物组合为黄铁矿 +绢云母 +石英 +毒砂 +白云母 +电气石 +方解石。该带中的黄铁矿呈浸染状和细脉状分布 (图 3(d))，当浸染状黄铁矿与绢云母共生时金矿化加强。绢云母呈显微鳞片状、叶片状定向散布于含矿碎屑岩中，是黑云母和绿泥石被成矿热液交代的产物。石英呈浸染状、细脉状或网脉状分布，当硅化叠加黄铁矿化和绢云母化时金矿化最强烈，且常使碎屑岩发生褪色而呈浅灰或灰白色。白云母常呈条带状沿微裂隙面分布，是绢云母再次被

表 2 李坝金矿矿体与围岩化学成分对比
Table 2 Comparison of the chemical composition between orebody and wall rock in the L ba gold deposit

样品	岩性	采样位置	w _B / %											w (Fe ₂ O ₃)	w (K ₂ O)
			SiO ₂	TD ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	w (/FeO)	/w (Na ₂ O)
90L - 7			59.48	0.67	19.53	1.13	6.10	0.56	3.79	0.08	3.43	0.80	0.13	0.18	4.29
90L - 6			57.32	0.74	19.89	2.02	5.45	1.01	4.88	0.10	3.64	1.20	0.13	0.37	3.03
90L - 5	斑点板岩	上盘围岩	58.65	0.64	18.67	2.33	5.32	1.34	4.03	0.09	3.16	1.00	0.12	0.42	3.16
90L - 4			54.02	0.67	18.82	3.03	4.54	2.91	4.44	0.13	3.58	0.60	0.15	0.67	5.97
平均			57.37	0.68	19.23	2.25	5.35	1.46	4.29	0.10	3.45	0.90	0.13	0.42	3.83
90L - 3			56.44	0.58	18.56	6.21	1.30	0.67	3.95	0.08	4.70	0.20	0.13	4.78	23.50
90L - 2	黄铁矿化	矿体	61.53	0.40	19.89	4.25	0.91	0.34	1.61	0.08	4.66	0.15	0.08	4.67	31.10
90L - 1	粉砂质斑		60.92	0.47	17.45	6.05	0.65	0.22	3.55	0.05	4.74	0.20	0.02	3.31	23.70
	点千枚岩		59.63	0.48	18.80	5.50	0.95	0.41	3.04	0.07	4.70	0.18	0.08	5.79	26.10
90L - 8			59.99	0.64	19.38	1.73	5.65	0.45	4.11	0.07	3.70	1.05	0.14	0.31	3.52
90L - 9	粉砂质斑	下盘围岩	62.77	0.74	17.65	1.44	5.71	0.56	4.07	0.09	3.07	1.00	0.15	0.25	3.07
90L - 10	点千枚岩		59.58	0.67	19.84	1.73	5.58	0.56	3.55	0.13	3.43	1.05	0.13	0.31	3.27
平均			60.78	0.68	18.96	1.63	5.65	0.52	3.91	0.10	3.00	1.03	0.14	0.29	3.30

注：样品由西北有色地质研究院测试中心测试；下同。

表 3 李坝金矿 6号矿带矿石 Au及相关微量元素含量 (w_B /10⁻⁶)
Table 3 Au and relative trace elements in ores of No. 6 ore belt in the L ba gold deposit(10⁻⁶)

采样位置	样品数	Au	Ag	As	Sb	Bi	Hg	Cu	Pb	Zn
近矿围岩	10	<0.1	0.26	234.22	19.09	0.32	0.16	45.67	45.00	153.98
矿化围岩	54	0.1~1	0.83	1 040.89	20.18	0.41	0.09	42.77	62.29	126.40
	80	1~3	1.48	1 572.46	25.87	0.76	0.10	45.66	94.46	136.06
矿体	31	3~5	2.19	1 612.40	40.28	0.35	0.10	42.12	189.31	142.51
	17	>5	1.30	1 820.76	26.98	0.38	0.07	35.29	50.47	88.30

表 4 李坝金矿围岩蚀变分带特征
Table 4 Characteristics of wall rock alteration zoning of the Liba gold deposit

蚀变分带	主要蚀变类型	绢云母 /%	石英 /%	绿泥石 /%	黑云母 /%	斑点构造矿物 组成	蚀变岩石 颜色	蚀变带 宽度 /m	Au平均含 量 /(g/t)
黄铁绢英岩化带 (I)	黄铁矿化 + 绢云母化 +硅化	75~55	35~20	<2	<1	黄铁矿 +绢云母 + 石英 +碳酸盐	灰白色 (褪色强烈)	1~70	3.570 0
绢云母化带 (II)	绢云母化 + 黄铁矿化	70~55	35~15	<5	<1	绢云母 +碳酸盐 + 石英 -黄铁矿	浅灰色	0~7	0.410 0
绿泥石化带 (III)	绿泥石化 + 褪色黑云母化	65~40	35~15	20~15	5~1	绿泥石 +碳酸盐 ± 绢云母	灰色	10~20	0.026 0
未蚀变岩石	区域性黑云母化	65~35	35~15	15~10	20~12	黑云母 +碳酸盐 ± 绢云母 -绿泥石	深灰色		0.003 5

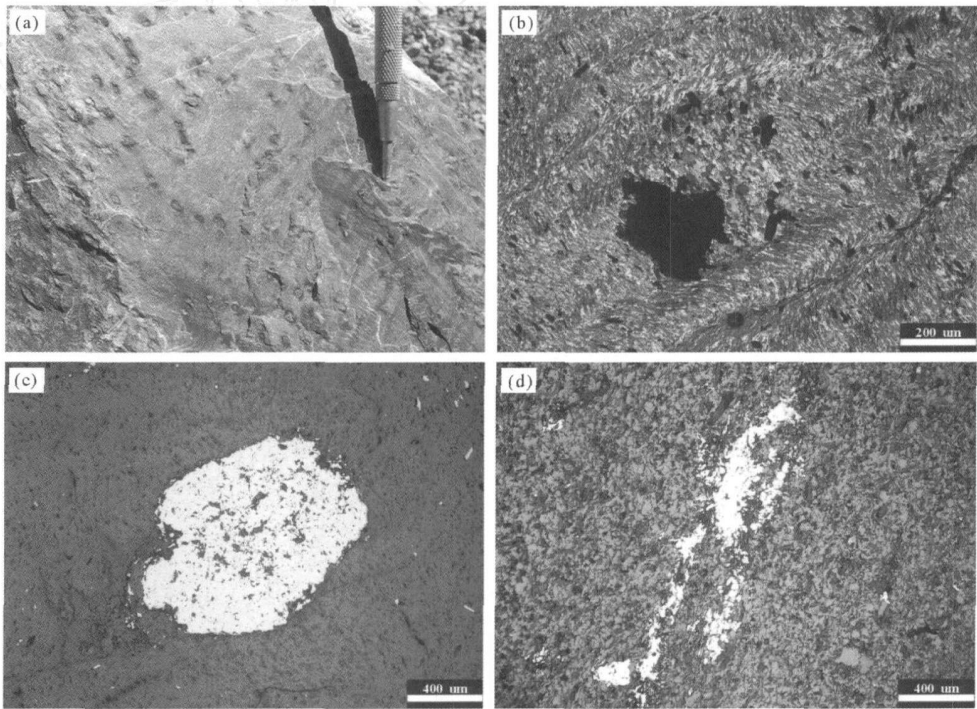


图 3 李坝金矿蚀变围岩中的斑点构造

Fig. 3 Spotted structure of altered wall rock in the Liba gold deposit

(a) 斑点状蚀变围岩；(b) 蚀变围岩斑点构造中的黄铁矿 +石英集合体；(c) 蚀变围岩中的含金黄铁矿斑点；(d) 蚀变围岩中的含金黄铁矿细脉

成矿热液交代的结果。碳酸盐则呈浸染状和细脉状分布，其中浸染状碳酸盐常交代残蚀石英、云母等矿物，细脉状碳酸盐则由方解石石英脉和纯碳酸盐脉组成；毒砂常与浸染状黄铁矿、石英及碳酸盐共生。

绢云母化带 (II)：该带位于富金矿体两侧围岩中，形成金矿化带，局部富集形成金矿体。与黄铁绢英岩化带呈渐变过渡，黄铁矿化减弱，绢云母化增强并出现绿泥石化，表现为含矿碎屑岩因蚀变交代而形成绢云母 +碳酸盐 +石英 -黄铁矿斑

点。蚀变矿物组合为绢云母 +绿泥石 +石英 +黄铁矿 -黑云母。该带中黄铁矿呈斑点状和细脉状分布，斑点状黄铁矿化与金矿化关系密切。绢云母呈致密状、网脉状和细脉状分布，是黑云母和绿泥石被成矿热液交代的产物；金矿化越强，黑云母和绿泥石被绢云母交代越强烈，绢云母分布也越致密。石英呈网脉状、细脉状和浸染状分布。在浸染状石英与绢云母富集处，金矿化最强烈，含矿碎屑岩褪色也最明显。

绿泥石化带 (III)：该带位于绢云母化带外侧，

沿断裂破碎带或岩石破碎带分布。绿泥石化带与绢云母化带呈渐变过渡关系，绿泥石化明显增强，绢云母化减弱，表现为含矿碎屑岩因蚀变交代而形成绿泥石 + 碳酸盐 ± 绢云母斑点。蚀变矿物组合为绿泥石 + 黑云母 ± 绢云母 ± 黄铁矿。该带岩石中的黑云母普遍被绿泥石交代，黑云母褪色明显，绿泥石呈鳞片浸染状、粒状集合体或微细脉状分布。该带内金矿化微弱，未形成金矿体。

4 蚀变带物质组分迁移特征

选择李坝金矿 6 号矿带 3 个蚀变带内具代表性的蚀变岩石和矿区外围的未蚀变岩石，进行了物质成分和组分统计 (表 5)，并运用 Grant^[14] 的计算方法来确定各蚀变带物质成分的相对迁移量：

$$\Delta C = (C_i^F / C_i^A) (C^A - C^F)$$

式中：C 为蚀变岩石相对于未蚀变岩石某组分迁移量； C_i^A 和 C_i^F 分别为蚀变岩石和未蚀变岩石惰性组分含量； C^A 和 C^F 分别为蚀变岩石与未蚀变岩石某组分含量值。

金红石的地球化学性质稳定，在区域及李坝

金矿区碎屑岩层内较常见，其化学成分主要为 TiO_2 。选择 TiO_2 作为不活泼组分，计算了各蚀变带内蚀变岩石组分迁移量，结果见表 6 和图 4、图 5。

黄铁绢英岩化带 (I)：该带内 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 Au 、 Ag 、 As 和 Sb 等组分不同程度地富集，而 FeO 、 MgO 、 Na_2O 、 Cu 、 Zn 、 Mn 和 Ba 等组分则不同程度地亏损。其中 SiO_2 富集与浸染状硅化有关； Fe_2O_3 富集而 FeO 亏损表明环境氧逸度增高，黄铁矿中的 Au 在氧化过程中被释放，并富集形成金银互化物； CaO 富集与碳酸盐化有关； K_2O 富集而 MgO 和 Na_2O 亏损与绢云母化有关，表明成矿流体使黑云母、绿泥石等矿物发生碱交代，向绢云母转变； Cu 、 Zn 和 Ba 等中低温成矿元素组分亏损，尤其 Ba 亏损强烈，表明成矿流体温度偏高，不利于中低温成矿元素富集； Au 、 Ag 、 As 和 Sb 富集明显，尤其 Au 和 As 强烈富集，且增幅最大，说明黄铁绢英岩化有利于金和毒砂富集成矿。

绢云母化带 (II)：该带内 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、

表 5 李坝金矿蚀变岩石元素含量测试结果统计
Table 5 Statistics of element contents in altered rocks in the L ba gold deposit

样品位置	样品数	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	MnO	K_2O	Na_2O	P_2O_5
黄铁绢英岩化带 (I)	16	61.66	0.48	18.13	3.99	1.33	0.73	1.91	0.04	4.71	0.22	0.05
绢云母化带 (II)	4	57.83	0.49	16.36	3.12	3.18	0.96	3.33	0.05	3.91	0.41	0.14
绿泥石化带 (III)	5	59.66	0.68	19.06	1.83	5.54	0.82	4.12	0.09	3.40	1.06	0.13
D_2 带 ^b 未蚀变岩石	4	61.59	0.54	17.44	1.65	4.51	0.50	3.99	0.07	3.21	1.41	0.20

样品位置	样品数	Au	Ag	As	Sb	Hg	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Mn	Ti	Cr	V	Ba	Sn
黄铁绢英岩化带 (I)	13	3 570.0	0.81	1 219	21.5	0.05	30.1	38.5	155.4	40.8	28.2	814	2 698	115	115	464	65
绢云母化带 (II)	6	312.9	0.29	646	15.5	0.04	26.2	28.8	158.0	36.5	14.0	700	3 501	110	110	463	50
绿泥石化带 (III)	15	23.9	0.14	165	5.0	0.04	36.1	39.1	181.6	60.2	17.9	869	4 626	129	126	462	80
D_2 带 ^b 未蚀变岩石	4	6.3	0.10	32	2.3	0.05	63.8	31.3	179.2	42.1	16.2	918	4 859	113	131	674	82

注：分析方法为 XRF1500/1700、ICP-MS；主要元素含量的单位为 %，微量元素含量的单位为 10^{-6} ， Au 含量的单位为 10^{-9} 。

表 6 李坝金矿各蚀变带内蚀变岩石组分迁移量
Table 6 Migration of major and trace elements of the different alteration zones in the L ba gold deposit

样品位置	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	MnO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	Au	Ag
黄铁绢英岩化带 (I)	0.08	- 0.07	0.78	2.63	- 3.58	0.26	- 2.34	- 0.03	1.69	- 1.34	- 0.17	4 009.16	0.80
绢云母化带 (II)	- 4.14	- 0.06	- 1.19	1.62	- 1.47	0.51	- 0.73	- 0.02	0.77	- 1.10	- 0.07	337.89	0.21
绿泥石化带 (III)	- 1.53	0.11	1.29	0.14	0.82	0.25	0.10	0.02	0.15	- 0.28	- 0.06	13.98	0.03

样品位置	As	Sb	Hg	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Mn	Ti	Cr	V	Ba	Sn
黄铁绢英岩化带 (I)	1 335.38	21.60	0	- 37.91	8.10	- 26.78	- 1.46	13.50	- 117.00	- 2 431.13	2.25	- 18.00	- 236.25	- 19.13
绢云母化带 (II)	676.65	14.55	- 0.01	- 41.44	- 2.76	- 23.36	- 6.17	- 2.42	- 240.24	- 1 496.57	- 3.31	- 23.14	- 232.53	- 35.27
绿泥石化带 (III)	105.62	2.14	- 0.01	- 22.00	6.19	1.91	14.37	1.35	- 38.91	- 185.03	12.71	- 3.97	- 168.35	- 1.59

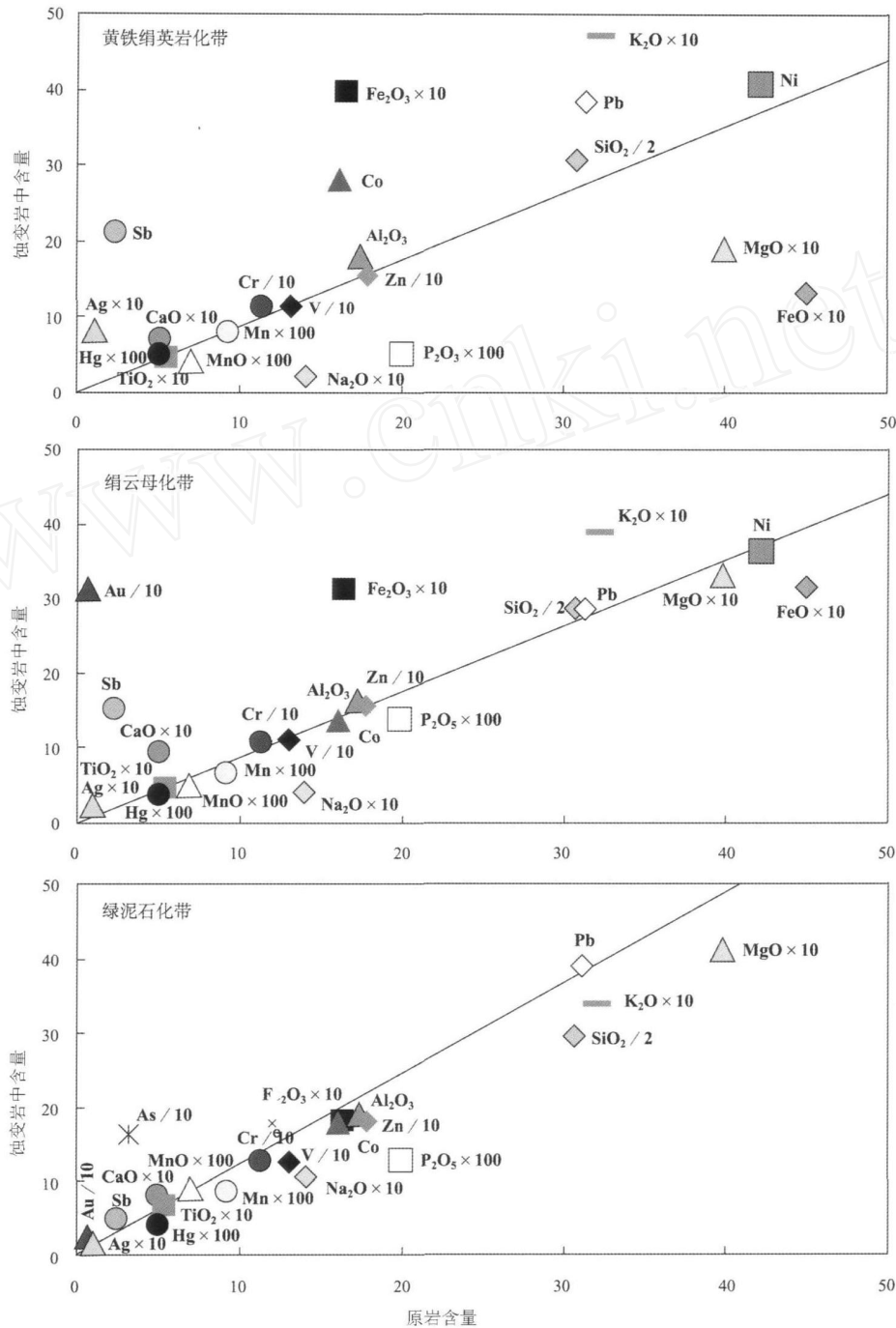


图 4 李坝金矿 6号矿带蚀变岩石组分迁移图解

Fig. 4 Diagrams of major and trace elements migration in altered rocks of the No. 6 ore belt in the Liba Au deposit

Au、Ag、As和 Sb等组分的富集及 FeO、MgO、Na₂O、Cu、Pb、Zn和 Ba等组分的亏损特征与黄铁绢英岩化带相似。所不同的是，本带内 SiO₂强烈亏损，且幅度较大，表现为 SiO₂组分从岩石中大量迁出而形成细脉状或网脉状石英脉，导致蚀变带内浸染状硅化减弱，因而不利于 Au的富集。

绿泥石化带 (III)：该带内 Fe₂O₃、FeO、CaO、K₂O、Au、Ag、As和 Sb等组分不同程度地富集，

而 SiO₂、Na₂O、Cu、Zn、Mn和 Ba等组分则不同程度地亏损。与绢云母化带相似，SiO₂亏损使带内缺乏浸染状石英，不利于 Au的富集；相对于前两个蚀变带，Fe₂O₃富集程度明显降低而 FeO则强烈富集，同样不利于 Au的富集；CaO富集是方解石脉发育的结果；K₂O和 MgO迁入而 Na₂O迁出与黑云母的绿泥石化增强有关；Cu、Zn和 Ba等组分迁出而 Au、Ag、As和 Sb等组分的少量迁入，

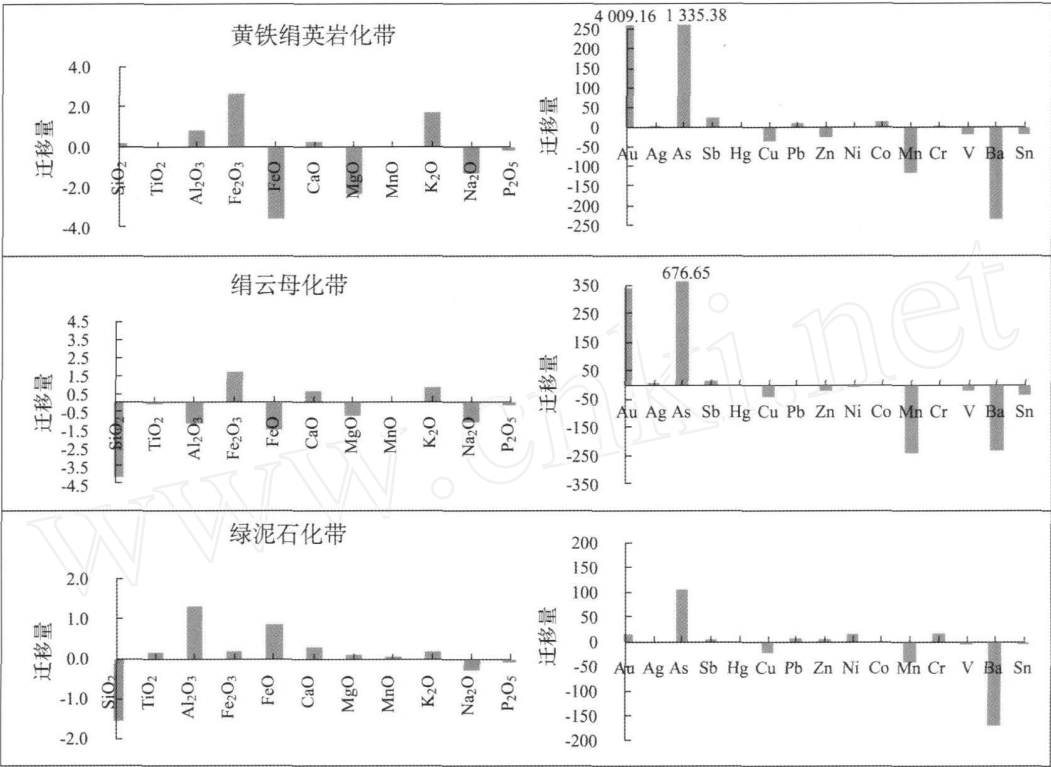


图 5 李坝金矿 6 号矿带不同蚀变带岩石组分迁移量

Fig.5 Migration of major and trace elements for the different alteration zones of the No. 6 ore belt in Liba Au deposit

表明与未蚀变岩石相比，Au、Ag、As 和 Sb 等组分在该带内开始富集。

5 讨论及结论

应汉龙、Li 和 Peters 等^[15-19]把卡林型金矿围岩蚀变分带模式概括为：自矿化中心向外，依次出现黄铁绢云母化带（黄铁矿 + 绢云母 + 毒砂 + 雄黄 + 雌黄 + 辉锑矿）、硅化带和去碳酸盐化带。其中处于金矿化中心的黄铁绢云母化带（黄铁矿 + 绢云母 + 毒砂 + 雄黄 + 雌黄 + 辉锑矿）也可笼统称作泥化带，其绢云母化强烈，并出现一系列中—低温含金硫化物矿物组合；硅化带则发育细脉、网脉状石英—浸染状石英→（似）碧玉岩；去碳酸盐化带中的方解石、白云石部分完全淋滤，并在金矿体周边形成大量方解石脉。各蚀变带相互套叠，蚀变程度随与金矿体距离的缩短而逐渐增强。

对比分析李坝金矿 6 号矿带 3 个蚀变带的蚀变矿物组合和物质成分迁移特征，可以看出：

(1) Au、Ag、As 和 Sb 元素在各带内均显示富集特征，只是富集程度不同。从绿泥石化带—绢云母化带—黄铁绢英岩化带，随着黄铁矿化和绢云母化的加深，Au 矿化不断增强，特别是当叠加

浸染状硅化时，Au 矿化最强烈。黄铁绢英岩化带内 Au 富集程度最高，每 100 g 蚀变岩石中 Au 高达 $4\,009.16 \times 10^{-6} \text{ g}$ ，直接形成工业矿体；绢云母化带内 Au 含量相对较低，为 $337.89 \times 10^{-6} \text{ g}$ ；绿泥石化带内 Au 含量最低，仅为 $13.98 \times 10^{-6} \text{ g}$ 。

(2) SiO_2 组分在各带内的迁移特征差别较大。在绿泥石化带和绢云母化带中，蚀变岩石内 SiO_2 组分表现为相对大量迁出，导致这 2 个带内普遍出现不含 Au 的细脉状和网脉状石英。但黄铁绢英岩化带内，蚀变岩石内 SiO_2 组分表现为相对迁入，致使该带内普遍出现浸染状硅化，此类蚀变可使 Au 进一步富集。

(3) Fe_2O_3 组分在各蚀变带内均表现为相对迁入，但迁入程度有差异，且较为明显的是与之相伴出现了 FeO 迁移量的相应变化。从绿泥石化带—绢云母化带—黄铁绢英岩化带，蚀变岩石内的 Fe_2O_3 含量相对迁入量不断增加，从 0.14% → 1.62% → 2.63%；相应地，FeO 组分则不断地迁出，并由相对的富集变为强烈的亏损，由 0.82% → -1.47% → -3.58%。上述特征表明，随着黄铁矿化和绢云母化的加深，环境氧逸度不断增高，Au 在黄铁矿中富集程度也在相应增高。

(4)各蚀变带内的 CaO 含量均表现为相对富集且程度相近的特征,这与各蚀变带内普遍发育方解石-石英脉的事实相吻合。 K_2O 、 Na_2O 和 MgO 组分在各蚀变带内迁移情况也类似,从绿泥石化带—绢云母化带—黄铁绢英岩化带,蚀变岩石内 K_2O 、 Na_2O 和 MgO 组分的相对迁入或迁出量不断增加,显示出黑云母被绢云母交代的程度不断加强的特点。

(5) Cu 、 Pb 、 Zn 和 Ba 元素在各蚀变带内以迁出为主, Hg 元素迁移不明显,而 Ba 元素亏损相对强烈,表明成矿流体温度较高,不利于中—低温成矿元素富集,这可能是李坝金矿不存在卡林型金矿特征矿物雌黄、雄黄的主要原因。

这3个蚀变带是叠加在区域变质作用之上的热液交代作用的结果,各带内矿物组合稳定,彼此差别明显,围岩蚀变和金矿化共同受成矿热水流体活动控制,物质组分迁移及蚀变类型与金矿化特征具有良好的对应关系。各蚀变带金矿化强度明显不同,黄铁绢英岩化带金矿化最强,形成富金的工业矿体;绢云母化带内因浸染状硅化和黄铁矿化的减弱,金矿化强度也大幅降低,仅局部地段形成工业矿体;绿泥石化带内则由于缺乏浸染状硅化,且绢云母化和黄铁矿化再度降低,致使岩石基本无金矿化。

综上所述,虽然一些学者根据李坝金矿的容矿围岩和金矿化等特征而将该矿床归入卡林型金矿^[2-4],但是从本文对李坝金矿6号矿带的研究结果来看,李坝金矿的围岩蚀变分带模式、元素迁移及金矿化特征与上述典型卡林型金矿的相关特征有明显差异。李坝金矿围岩蚀变与金矿化关系密切,其蚀变分带模式在西秦岭地区的造山型金矿中具有一定的代表性。

致谢:野外工作得到甘肃有色金属地质勘查局徐岩、李雨落同志的大力协助,室内测试得到西北有色地质研究院测试中心朱华平和李红的热情帮助,并承蒙汤中立院士提出宝贵修改意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] 柳森. 李坝式金矿的找矿标志及找矿方法 [J]. 甘肃地质学报, 1994, 3(1): 79 - 89.
- [2] 韦龙明. 中国卡林型金矿床金矿物的一般特征 [J]. 黄金地质, 1996, 2(3): 66 - 70.
- [3] 张复新, 宗静婷, 马建秦. 秦岭卡林型金矿床及相关问题探讨 [J]. 矿床地质, 1998, 17(2): 172 - 184.
- [4] 张复新, 张旺定, 张正兵. 秦岭造山带金矿床类型与构造背景 [J]. 黄金地质, 2000, 6(4): 59 - 65.
- [5] 毛景文. 西秦岭地区造山型与卡林型金矿床 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(1): 11 - 13.
- [6] Mao Jingwen, Qiu Yumin, Richard J, et al. Geology, distribution, and classification of gold deposits in the western Qinling belt, central China [J]. Mineralium Deposita, 2002, 37: 352 - 377.
- [7] 张姚代, 王争鸣, 董新. 岩体与金矿的关系: 以李坝式金矿为例 [J]. 甘肃地质学报, 2001, 10(2): 52 - 65.
- [8] 冯建忠, 汪东波, 王学明, 等. 甘肃礼县李坝大型金矿床成矿地质特征及成因 [J]. 矿床地质, 2003, 22(3): 257 - 263.
- [9] 冯建忠. 秦岭凤太—礼县地区金矿床成矿地质地球化学研究 [D]. 北京: 北京大学, 2001: 1 - 70.
- [10] 黄杰, 王建业, 韦龙明. 甘肃李坝金矿床地质特征及成因研究 [J]. 矿床地质, 2000, 9(2): 105 - 115.
- [11] 王相, 唐荣杨, 李实, 等. 秦岭造山与金属成矿 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 187 - 229.
- [12] Goldfarb R J, Groves D I, Cardoll S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis [J]. Ore Geology Reviews, 2001, 18: 1 - 75.
- [13] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. Ore Geology Reviews, 1998, 13: 7 - 27.
- [14] Grant J A. The isocon diagram: A simple solution to Gresens' equation for metamorphic alteration [J]. Economic Geology, 1986, 81: 1976 - 1982.
- [15] 应汉龙. 卡林型金矿床的特征和成因 [J]. 地质地球化学, 2001, 29(4): 56 - 64.
- [16] Li Zhiping, Peters S G. Comparative geology and geochemistry of sedimentary-rock-hosted (Carlin-type) gold deposits in the People's Republic of China and in Nevada, USA [R]. California: Department of the Interior U. S. Geological Survey, 1998: 98 - 466.
- [17] Peters S G. Geology, geochemistry and geophysics of sedimentary-rock-hosted Au deposits in People's Republic of China [R]. California: Department of the interior U. S. Geological Survey, 2002: 102 - 131.
- [18] 杜子图, 吴淦国, 王义强. 微细粒浸染型金矿的构造动力成矿作用研究: 以西秦岭巴西金矿为例 [J]. 现代地质, 1998, 12(1): 75 - 82.
- [19] 齐金忠, 杨贵才, 罗锡明. 甘肃阳山金矿带构造岩浆演化与金矿成矿 [J]. 现代地质, 2006, 20(4): 564 - 572.