

引用格式: 贾润幸, 方维萱, 2022. 云南个旧芦塘坝矿段层间矿成因及构造-岩相控矿规律 [J]. 地质力学学报, 28 (1): 67-77. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222804

Citation: JIA R X, FANG W X, 2022. The genesis and ore-controlling regularity of interbedded orebodies controlled by tectonics and lithofacies in Lutangba, Gejiu, Yunnan Province [J]. Journal of Geomechanics, 28 (1): 67-77. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222804

云南个旧芦塘坝矿段层间矿成因及构造-岩相控矿规律

贾润幸^{1,2}, 方维萱^{1,2}
JIA Runxing^{1,2}, FANG Weixuan^{1,2}

1. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012;
2. 有色金属矿产地质调查中心矿山生态环境资源创新实验室, 北京 100012
1. China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China;
2. Innovation Laboratory of Mine, Environment and Mineral, China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China

The genesis and ore-controlling regularity of interbedded orebodies controlled by tectonics and lithofacies in Lutangba, Gejiu, Yunnan Province

Abstract: The Gejiu tin deposit in Yunnan Province is a world-class super-large tin-polymetallic deposit, and the interbedded deposit (cassiterite-sulfide) is one of the important deposit types, but its genesis has been debated. The mineral fabric and geochemical characteristics of the interbedded orebodies of No. 10 Ore Group at different levels of the Lutangba section in the Gaosong ore field were systematically studied to further discuss the genesis and provide theoretical basis for deep exploration of this type of deposit. The study results show that there is big difference between primary ore and oxidized ore. In the primary ore of the interbedded orebodies, the metallic sulfides are mainly pyrrhotite, pyrite, sphalerite, chalcopyrite, etc; the gangue minerals are mainly tremolite, fluorite and a few quartz, etc. In the oxidation ore of interbedded orebodies, most cassiterites are reddish-brown and irregular, and a small amount of cassiterite is hypidiomorphic, with a particle size of 0.07~0.3 mm according to the analysis of heavy sand. Comparing the primary ore and oxidized ore at different elevations, we found that the loss of SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅ and ignition loss are greater than that of primary sulfide ores in general, except that the content of S and FeO in oxidized ores is less than that of primary ores. The analysis results of the main elements at different elevations of the primary ore show that CaO and P₂O₅ increase from the bottom to the top, while MgO, S and ignition loss show a wave-like change from small to large and then smaller. In addition, the metallic sulfide in the primary ore has obvious zonation, with copper mineralization in the lower part and zinc mineralization in the upper part. The oolitic colloidal pyrite and pores formed by early high temperature exhalation can be seen in the upper part of the primary ore, while the lower part is mostly automorphic to hypidiomorphic pyrite. We hold the opinion that the interbedded orebodies in Lutangba mainly are related to post-magmatic gasification hydrothermal of the late Yanshanian period, and are obviously controlled by the tectonics and lithofacies. In the Indosinian period, the north-south compression formed multiple interlayer detachment structures between the calcareous dolomite and limestone strata, which are the important ore-hosting structures. The NE faults (such as the Lutangba fault) formed in the late Yanshanian period are the important passable structures. During the post-magmatic gasification hydrothermal transgression through NE faults, gently inclined orebodies were formed in the multiple interlayer detachment structures, and finally, steep inclined orebodies formed in the faults. The widely developed karstification in this area has a great influence on mineralization, which further enlarges the

基金项目: 科技部转制科研院所专项资金项目 (2008EG115074)
This research is financially supported by the Special Fund of the State Ministry of Science and Technology (Grant No. 2008EG115074)

第一作者简介: 贾润幸 (1969—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为金属矿床地球化学。E-mail: chookdog@163.com

收稿日期: 2021-08-27; **修回日期:** 2021-10-11; **责任编辑:** 吴芳

ore-hosting structure formed in the Indosinian period before mineralization, and accelerates the oxidation of interbedded orebody margins after mineralization.

Key words: Gejiu tin polymetallic deposit; interbedded orebody; deposit genesis; ore-controlling regularity by tectonics and lithofacies

摘 要: 云南个旧锡矿是世界级超大型锡多金属矿床, 层间矿床 (锡石-硫化物) 是其中重要的矿床类型之一, 其成因也一直存在争议, 为了进一步探讨其成因并对该类型矿床的深部勘查提供理论依据, 重点对个旧锡矿高松矿田芦塘坝矿段 10 号矿群不同中段层间矿体的岩石矿物组构和地球化学特征进行了研究。结果表明层间矿床中的原生矿体多为块状硫化矿石, 金属硫化物主要为磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿等, 脉石矿物主要为透闪石、萤石和少量的石英等; 层间矿床中的氧化矿经重砂分析, 该矿中的锡石多为红褐色不规则状, 少量为半自形状, 粒径 0.07~0.3 mm。通过对不同中段原生矿和氧化矿的对比分析, 总体上氧化矿石中除 S 和 FeO 含量小于原生矿石外, SiO₂、Al₂O₃、TiO₂、MnO、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅ 和烧失量等均大于原生硫化矿石。单一原生矿体不同中段的主量元素分析结果显示, 从下部到上部, 矿体中的 CaO 和 P₂O₅ 具有增大趋势, MgO、S 和烧失量具有从小变大再变小的波状变化。此外, 原生矿中的金属硫化物具有明显的分带性, 铜矿化分布在下部, 锌矿化分布在上部。在上部原生矿中可见到早期高温喷气形成的胶状黄铁矿和气孔, 下部则多为自形-半自形的黄铁矿。个旧芦塘坝层间矿主要与燕山晚期岩浆期后气化-热液有关, 并受构造和岩相作用控制明显。印支期南北向挤压作用在灰质白云岩层和石灰岩层间形成滑脱构造, 为重要的储矿构造, 燕山晚期形成的北东向断裂 (如芦塘坝断裂) 为重要的导矿构造。当燕山晚期岩浆期后气化-热液上侵时在层间滑脱构造带中形成缓倾斜矿体, 而后在切层断裂带中形成陡倾斜矿体。该地区广泛发育的岩溶作用对成矿作用具有重大影响, 在成矿前对印支期形成的储矿构造具有进一步的扩容作用, 在成矿后又加速了层间矿边部的氧化。

关键词: 个旧锡多金属矿; 层间矿; 矿床成因; 构造-岩相控矿规律

中图分类号: P612 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 01-0067-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222804

0 引言

个旧锡矿是世界级超大型锡多金属矿床, 矿床类型主要有花岗岩接触带锡铜多金属矿床、电气石细脉带锡矿床、层间矿床 (锡石-硫化物)、变基性火山岩铜矿床、断裂带银铅锡矿床等。关于个旧锡矿的成因, 长期以来, 大多数学者 (庄永秋等, 1996; 马德云等, 2004; 贾润幸等, 2004, 2007; Jia et al., 2004, 2010; 毛景文等, 2008) 认为与燕山期岩浆期后气化-热液有关。

由于个旧地区的层间矿床 (锡石-硫化物) 多远离花岗岩体, 在现有的矿山中除仅存有少量的原生矿外, 大部分矿体已发生了氧化, 因而习惯上也称其为“层间氧化矿”。关于个旧地区该类型矿床的成因从 20 世纪 80 年代以来一直存在争议, 金祖德 (1991) 认为层间赤铁矿型锡矿是典型的沉积矿床, 彭张翔 (1992) 认为个旧锡矿为一个成因比较复杂的层控型锡多金属矿床, 一些学者 (周

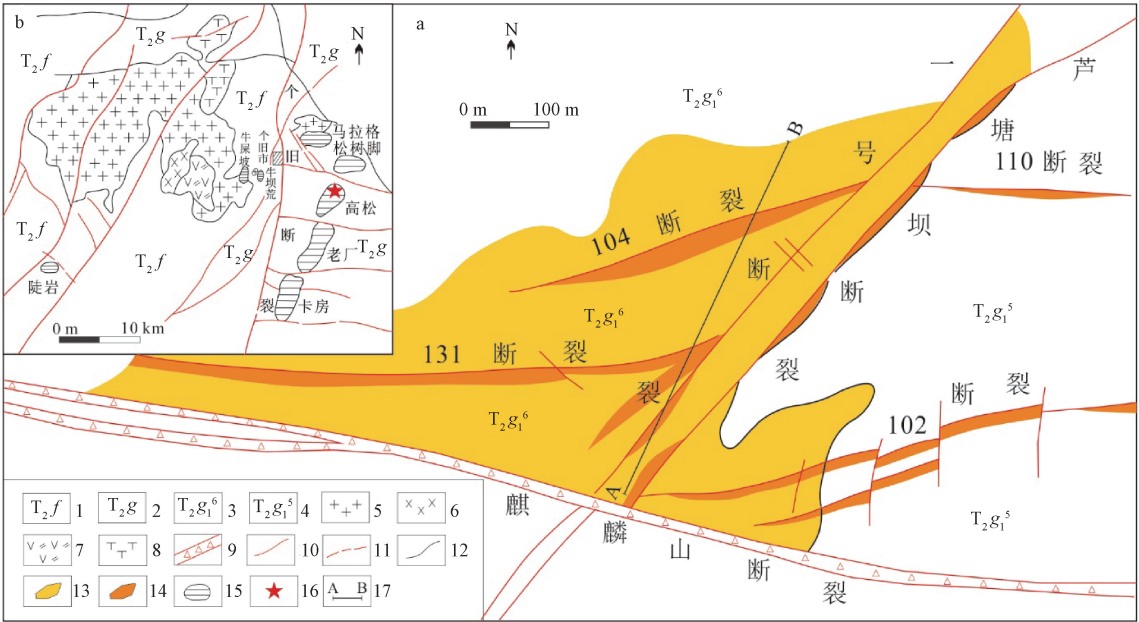
建平等, 1999; 张欢等, 2007; 黎应书等, 2009; 钱志宽等, 2009) 根据层间原生矿体中发现的胶状和鲕状黄铁矿矿石具有条带状构造和藻类化石等, 认为是海底喷流沉积成因。秦德先等 (2006) 将个旧锡矿不同类型矿床划分为三个成矿系列, 即印支期海底基性火山沉积成矿系列、印支期海底喷流沉积成矿系列和燕山期花岗岩叠加改造成矿系列。

由于多年来对深部接触带硫化矿体和地表砂锡矿的大量开采, 个旧地区近几年越来越重视层间矿床 (锡石-硫化物) 的找矿工作; 但该类型矿床的矿体数量多、单个矿体规模小且多为盲矿体, 其找矿工作有一定难度。个旧锡矿高松矿田芦塘坝矿段是最具代表性的层间矿床 (锡石-硫化物) 发育地区, 文中重点对个旧锡矿高松矿田芦塘坝矿段 10 号矿群不同中段层间矿体的岩石矿物组构和地球化学特征进行了对比研究, 以进一步探讨该类型矿床的成因, 研究其控矿规律, 旨在为个旧地区近年开展层间矿床的深部勘查提供理论依据。

1 地质概况

个旧锡多金属矿区位于滇东南地区南部, 该区出露地层主要为二叠系、三叠系、第三系和第四系。上三叠统以前的地层以海相沉积为主, 上三叠统及以后主要为陆相沉积。矿区处于多条深大断裂的交汇部位, 南北向的个旧断裂将矿区分分为东区和西区, 个旧锡矿主要产于东区。东西向断裂将矿带从北至南分为马拉格矿田、松树脚矿田、

高松矿田、老厂矿田和卡房矿田 (图 1)。区内岩浆具有多期活动特征, 可分为华力西旋回、印支旋回和燕山旋回。华力西旋回和印支旋回主要为来源于深源岩浆的火山喷溢作用, 燕山旋回主要为重熔花岗岩岩浆的侵入作用。华力西旋回二叠纪火山岩沿个旧矿区的北、西、西南边部分布; 印支旋回的火山岩分布于矿区东南部; 燕山旋回以花岗岩为主, 包括基性、碱性侵入岩在内大面积出露于矿区中部, 而与成矿关系最为密切的晚期花岗岩隐伏于矿区东部。



1—中三叠统法郎组 (T_2f); 2—中三叠统个旧组 (T_2g); 3—中三叠统个旧组卡房段第 6 层 ($T_2g_1^6$); 4—中三叠统个旧组卡房段第 5 层 ($T_2g_1^5$); 5—燕山晚期花岗岩类; 6—燕山早期辉长岩; 7—燕山早期二长岩; 8—燕山晚期碱性岩; 9—断层角砾岩; 10—断裂; 11—推测断裂; 12—地质界线; 13—缓倾斜层间矿; 14—陡倾斜层间矿; 15—矿田; 16—研究区位置; 17—图 2 地质剖面位置
a—个旧高松矿田芦塘坝层间矿分布图; b—个旧区域地质略图 (据庄永秋等, 1996 修改)

图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological map of the study area

(a) Distribution map of interbedded orebodies in Lutangba of the Gaosong ore field in Gejiu; (b) Sketch map of regional geology in Gejiu, Yunnan (modified after Zhuang et al., 1996)

1—Middle Triassic Falang Formation (T_2f); 2—Middle Triassic Gejiu Formation (T_2g); 3—The sixth layer of the Kafang member of the Gejiu Formation in Middle Triassic ($T_2g_1^6$); 4—The fifth layer of the Kafang member of the Gejiu Formation in Middle Triassic ($T_2g_1^5$); 5—Late Yanshanian granitoids; 6—Early Yanshanian gabbro; 7—Early Yanshanian monzonite; 8—Late Yanshanian alkaline rocks; 9—Fault breccia; 10—Fault; 11—Inferred fault; 12—Geological boundary; 13—Gently inclined interbedded ore; 14—Steeply inclined interbedded ore; 15—Ore field; 16—Study area; 17—Location of geological profile in Fig. 2

个旧芦塘坝层间矿位于高松矿田中北部, 矿体按产状和形态可分别为陡倾斜脉状矿体和缓倾斜似层状矿体。该区出露地层主要为中三叠统个旧组卡房段第 6 层 ($T_2g_1^6$) 和第 5 层 ($T_2g_1^5$)。中三叠统个旧组卡房段第 6 层 ($T_2g_1^6$) 为灰色、深灰色中厚层状石灰岩与含灰质白云岩互层, 厚度为 41.5~200 m, 绝大部分似层状矿体及脉状矿体产

于此层。中三叠统个旧组卡房段第 5 层 ($T_2g_1^5$) 为灰色、中厚层状石灰岩, 上部夹 2~3 层条带灰质白云岩, 延伸稳定; 下部为含燧石结核薄层灰岩, 该层厚度为 336~662.7 m, 少数脉状矿体和似层状矿体产于此层。该区褶皱和断裂均较发育, 芦塘坝位于北西西向的大箐-阿西寨向斜北翼。主要断裂为北东向芦塘坝断裂及其派生的一号断裂, 其

次级断裂有北东东向的 104 断裂和 102 断裂及近东西向的 131 断裂和 110 断裂, 上述断裂中均可见到矿化; 在芦塘坝断裂东侧并切断 102 断裂的南北向小断裂多呈隐伏状产出, 未见明显矿化。北西西向的麒麟山断裂明显错断了北东向断裂, 并在南侧有多条平行破碎带产出 (图 1a)。且芦塘坝断裂为深大断裂, 在深部工程的钻探剖面图中依然可见 (图 2), 但其派生的一号断裂仅出现在浅部, 没有延伸到深部。该区地表未见岩浆岩出露, 深

部隐伏有燕山中晚期花岗岩 (庄永秋等, 1996)。

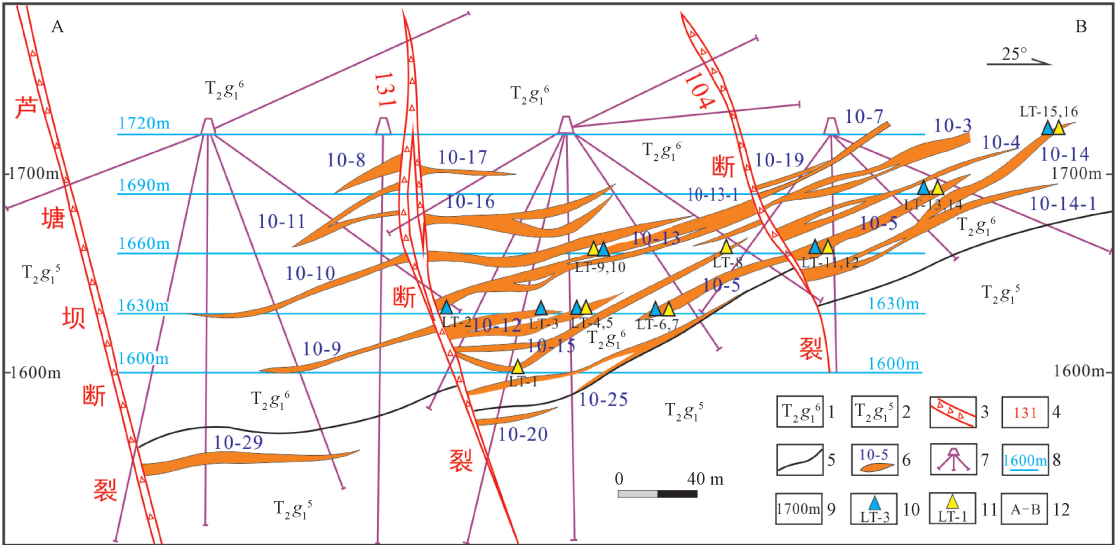
2 样品采集及分析结果

矿石样品主要采于个旧高松矿田芦塘坝 10 号矿群层间矿中的 5 号矿体 (编号 10-5)、12 号矿体 (编号 10-12)、13 号矿体 (编号 10-13)、14 号矿体 (编号 10-14)、15 号矿体 (编号 10-15) 所在的不同中段共计采样 16 件 (LT-1—LT-16; 表 1), 采样位置详见图 2。

表 1 个旧芦塘坝层间矿主量元素分析结果 (%)

Table 1 Analysis results of major elements (%) of interbedded orebodies in Lutangba, Gejiu

样品 编号	矿体 编号	中段	采样位置	类型	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	烧失量	P ₂ O ₅	Cu	Zn	S	总量
LT-1	10-15	1600 m	T721 西 4 m	氧化矿	39.75	1.83	15.41	5.80	3.02	0.06	19.33	2.54	0.43	6.72	3.90	0.56				99.35
LT-2	10-13	1630 m	K721 西 15 m	原生矿	3.87	0.54	0.25	60.41	6.20	0.01	0.04	0.20	0.10	0.04	0.50	1.10	0.41		26.04	99.71
LT-3	10-12	1630 m	K1791 西 30 m	原生矿	1.44	0.57	0.15	60.04	5.10	0.03	0.19	0.18	0.19	0.10	1.20	1.67	0.66		28.00	99.52
LT-4	10-12	1630 m	K1791 东 10 m	原生矿	12.93	0.46	0.15	61.41	6.58	0.02	0.27	0.33	0.25	0.12	1.15	0.46	0.29		15.10	99.52
LT-5	10-12	1630 m		氧化矿	11.31	0.89	8.59	40.8	1.07	0.48	6.10	9.30	0.14	0.36	17.75	0.93	0.28		1.60	99.60
LT-6	10-5	1630 m	K181 西 2 m	原生矿	6.24	0.47	0.15	60.89	5.95	0.06	0.41	0.38	0.09	0.06	0.70	0.30			24.00	99.70
LT-7	10-5	1630 m	K181 西 3 m	氧化矿	6.00	0.64	2.53	74.54	8.69	0.33	0.51	0.84	0.20	0.09	1.00	0.70		0.44	3.10	99.61
LT-8	10-15	1660 m	L1101 点西 20 m	氧化矿	4.60	0.50	0.15	83.57	6.90	0.06	0.15	0.27	0.09	0.08	1.44	0.67			1.28	99.76
LT-9	10-13	1660 m		氧化矿	4.80	0.68	0.16	80.77	8.90	0.34	0.25	0.44	0.11	0.08	1.00	1.63			0.66	99.82
LT-10	10-13	1660 m	L901 点西 40 m	原生矿	6.63	0.69	0.10	55.05	16.94	0.05	0.23	1.47	0.12	0.07	1.00	0.96	0.46		16.10	99.87
LT-11	10-5	1660 m		原生矿	4.84	0.40	0.10	60.89	1.90	0.11	0.51	1.84	0.15	0.04	0.80	0.46		0.29	27.28	99.61
LT-12	10-5	1660 m	L1231 东 50 m	氧化矿	13.40	0.71	7.67	56.94	1.78	0.26	1.24	4.22	0.16	0.31	10.09	1.17			1.66	99.61
LT-13	10-5	1690 m		原生矿	8.84	0.50	0.10	65.61	4.90	0.01	0.17	2.83	0.14	0.04	0.45	0.73		0.44	15.00	99.76
LT-14	10-5	1690 m	1039 西 15 m	氧化矿	12.18	1.03	12.63	42.67	3.70	1.51	1.33	4.92	0.21	0.48	14.10	1.23		1.54	1.44	99.54
LT-15	10-14	1720 m		原生矿	9.72	0.73	2.10	37.34	3.31	0.03	0.49	3.60	0.10	0.07	20.29	2.17		4.27	14.42	99.43
LT-16	10-14	1720 m		氧化矿	12.63	0.71	0.15	69.85	6.10	0.14	0.64	1.78	0.10	0.04	1.10	4.33			1.53	99.68



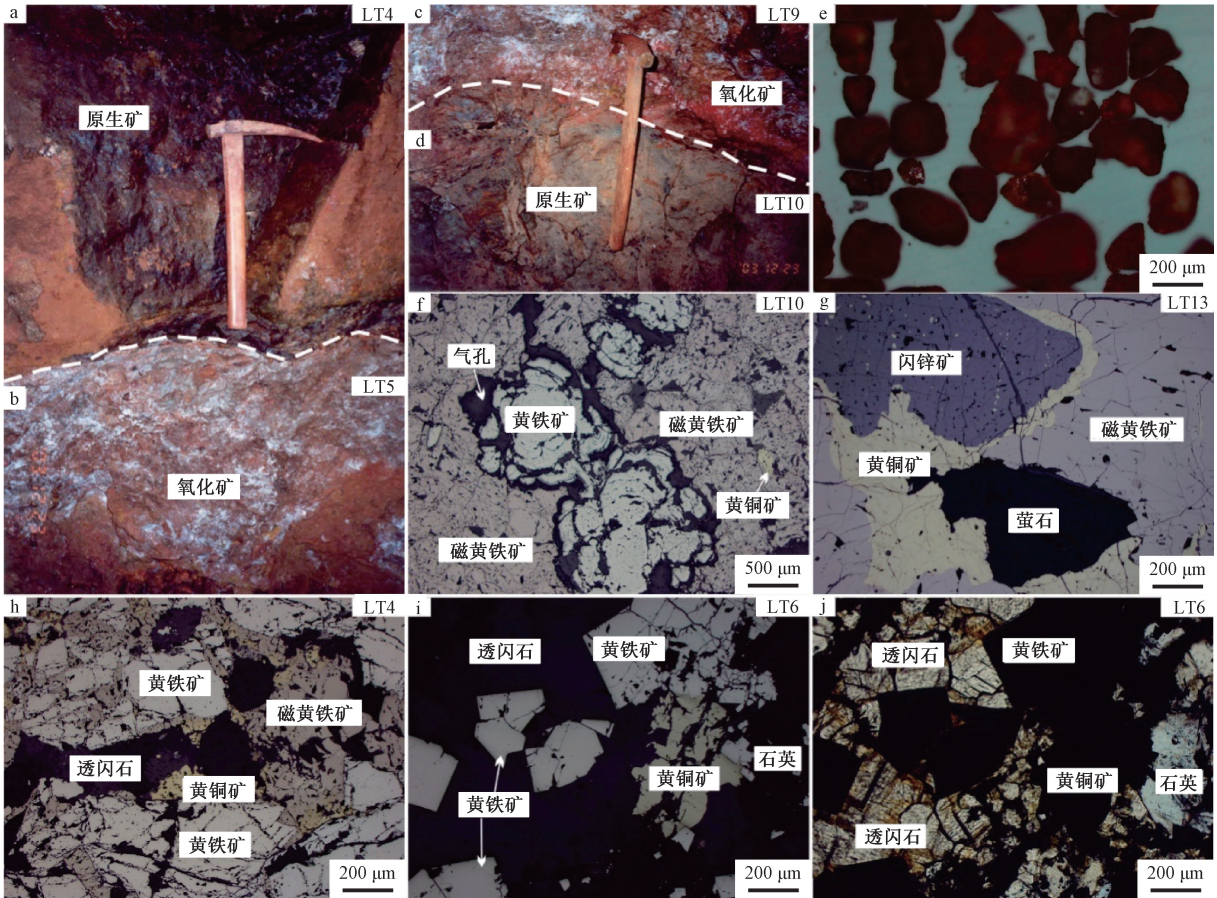
1—中三叠统个旧卡房段第 6 层 ($T_2g_1^6$)；2—中三叠统个旧卡房段第 5 层 ($T_2g_1^5$)；3—断层及角砾岩；4—断裂名称；5—地质界线；6—10 号矿群中矿体编号；7—坑道内钻孔位置；8—采矿中段；9—高程；10—原生矿样品及编号；11—氧化矿样品及编号；12—图 1 中地质剖面

图 2 个旧芦塘坝 10 号矿群不同层间矿样品采集位置图 (据马德云等, 2004 修改)

Fig. 2 Sample location from different interbedded orebodies of No. 10 Ore Group in Lutangba, Gejiu (modified after Ma et al. , 2004)
1-The sixth layer of the Kafang member of the Gejiu Formation in Middle Triassic ($T_2g_1^6$) ; 2-The fifth layer of the Kafang member of the Gejiu Formation in Middle Triassic ($T_2g_1^5$) ; 3-Fault and breccia; 4-Fault name; 5-Geological boundary; 6-Orebody number in No. 10 Ore Group; 7-Drilling location in the tunnel; 8-Mining level; 9-Elevation; 10-Sample numbers of primary ore; 11-Sample numbers of oxidized ore; 12-Location of geological profile in Fig. 1

样品重量一般为 1000~2000 g, 室内切制电子探针片后, 再进行样品加工。样品加工前先切掉氧化或蚀变膜, 选择新鲜的岩块作为测试对象, 样品经过洗涤、烘干后先破碎再加工到 0.074 mm, 每个样

品重约 100 g。样品全岩主量元素分析在中科院地球化学研究所采用化学分析法完成, 分析结果见表 1。矿石薄片在日本 OLYMPUSBX51 型显微照相系统下进行鉴定并照相, 部分镜下照片见图 3。



a—1630 中段 10-12 号矿体中的原生矿 (样品 LT-4); b—1630 中段 10-12 号矿体中的氧化矿 (样品 LT-5); c—1660 中段 10-13 号矿体中的氧化矿 (样品 LT-9); d—1660 中段 10-13 号矿体中原生矿 (样品 LT-10); e—氧化矿中重砂锡石; f—1660 中段 10-13 号矿体中原生矿 (样品 LT-10) 中含气孔胶状黄铁矿; g—1690 中段 10-5 号矿体中原生矿 (样品 LT-13) 中的萤石和金属硫化物; h—1630 中段 10-12 号矿体原生矿 (样品 LT-4) 中的金属硫化物和透闪石; i—1630 中段 10-5 号矿体原生矿 (样品 LT-5) 中的透闪石和自形黄铁矿, 黄铜矿和少量石英 (反射光); j—1630 中段 10-5 号矿体原生矿 (样品 LT-5) 中的透闪石和自形黄铁矿, 黄铜矿和少量石英 (单偏光)

图 3 个旧芦塘坝层间矿石组构特征

Fig. 3 Fabric characteristics of interbedded ores in Lutangba, Gejiu

(a) Primary ore in No. 10-12 orebody at the mining level of 1630 m (sample LT-4); (b) Oxidized ore in No. 10-12 orebody at the mining level of 1630 m (sample LT-5); (c) Oxidized ore in No. 10-13 orebody at the mining level of 1660 m (sample LT-9); (d) Primary ore in No. 10-13 orebody at the mining level of 1660 m (sample LT-10); (e) Cassiterite in oxidized ore; (f) Stomatal colloidal pyrite in the primary ore from No. 10-13 orebody at the mining level of 1660 m (sample LT-10); (g) Fluorite and metal sulfide in the primary ore from No. 10-5 orebody at the mining level of 1690 m (sample LT-13); (h) Metallic sulfide and tremolite in the primary ore from No. 10-12 orebody at the mining level of 1630 m (sample LT-4); (i) Tremolite, idiomorphic pyrite, chalcopyrite and quartz (reflected light) in the primary ore from No. 10-12 orebody at the mining level of 1630 m (sample LT-5); (j) Tremolite, idiomorphic pyrite, chalcopyrite and quartz (single-polarized light) in the primary ore from No. 10-12 orebody at the mining level of 1630 m (sample LT-5)

3 矿石地球化学特征

3.1 矿石矿物组构特征

从个旧高松矿田芦塘坝不同中段层间矿体的

矿石矿物组构特征来看 (图 3), 在 1630 m 中段、1660 m 中段、1690 m 中段和 1720 m 中段均可观测到原生矿体, 原生矿体的矿石多为致密块状硫化矿石, 在靠近上下盘围岩一侧通常会发生不同程度的氧化而呈褐红色, 原生矿与氧化矿之间因硬

度的不同而差异明显。如在 1630 m 中段的 10-12 号矿体，其上部为原生矿（图 3a），下部为氧化矿（图 3b）；在 1660 m 中段的 10-13 号矿体，其上部为氧化矿（图 3c），其下部为原生矿（图 3d）。通过对层间氧化矿石进行重砂分析，其中的锡石矿物多呈红褐色不规则状，少量为半自形状，粒径 0.07~0.3 mm（图 3e）。原生矿体致密块状硫化矿石经显微镜下鉴定，矿石中的金属硫化物主要为磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿等，硫化物中的黄铁矿可分为胶状黄铁矿和自形-半自形黄铁矿（图 3f、3h、3i），前者多分布于上部，如 1660 m 中段 LT-10 样品；后者多分布于下部，如 1630 m 中段 LT-6 样品中的立方体状黄铁矿和 LT-4 样品中的半自形黄铁矿。胶状黄铁矿和半自形黄铁矿常被磁黄铁矿交代，自形黄铁矿常被黄铜矿交代。原生矿石中的脉石矿物主要为透闪石、萤石和少量的石英等（图 3j、3g）。透闪石多呈自形，半自形，常被黄铁矿、磁黄铁矿等金属硫化物胶结；萤石多呈他形粒状，常被磁黄铁矿、黄铜矿等胶结，且在不同中段中上部萤石矿物的含量相对较高。

3.2 矿石地球化学特征

为了查定个旧高松矿田芦塘坝层间矿中原生矿石与氧化矿石化学成分的变化，对表 1 中 16 件层间矿主量元素进行分组统计分析，8 件氧化矿石样品（LT-1、LT-5、LT-7—LT-9、LT-12、LT-14、LT-16）中 SiO₂ 含量 4.60%~39.75%，平均为 13.08%；Al₂O₃ 含量 0.15%~15.41%，平均为 5.91%；Fe₂O₃

含量 5.80%~83.57%，平均为 56.87%；FeO 含量 1.07%~8.90%，平均为 5.02%；MnO 含量 0.06%~0.48%，平均为 0.40%；MgO 含量 0.15%~19.33%，平均为 3.69%；CaO 含量 0.27%~9.30%，平均为 3.04%；Na₂O 含量 0.09%~0.43%，平均为 0.18%；K₂O 含量 0.04%~6.72%，平均为 1.02%；P₂O₅ 含量 0.56%~4.33%，平均为 1.40%；烧失量 1.00%~17.75%，平均为 6.30%；S 含量 0.00%~3.10%，平均为 1.61%。8 件原生硫化物矿石样品（LT-2—LT-4、LT-6、LT-10、LT-11、LT-13、LT-15）中 SiO₂ 含量 1.44%~12.93%，平均为 6.81；Al₂O₃ 含量 0.10%~2.10%，平均为 0.39%；Fe₂O₃ 含量 37.34%~65.61%，平均为 57.71%；FeO 含量 1.90%~16.94%，平均为 6.36%；MnO 含量 0.01%~0.11%，平均为 0.04%；MgO 含量 0.04%~0.51%，平均为 0.27%；CaO 含量 0.18%~3.60%，平均为 1.35%；Na₂O 含量 0.09%~0.25%，平均为 0.14%；K₂O 含量 0.04%~0.12%，平均为 0.07%；P₂O₅ 含量 0.30%~2.17%，平均为 0.98%，含磷较高主要与磷铜矿和蓝磷铜矿等表生成因矿物密切相关；烧失量 0.45%~20.29%，平均为 3.26%；S 含量 14.42%~28.00%，平均为 20.74%。从 8 件氧化矿和 8 件硫化矿中主量元素平均含量变化曲线图来看（图 4），总体上，除氧化矿石中的 S 和 FeO 小于原生矿石外，氧化矿石中的 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MnO、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅ 和烧失量等均大于原生硫化矿石，同时 Cu 和 Zn 等金属元素由于硫化矿的氧化而发生了一定的流失使其含量变小。

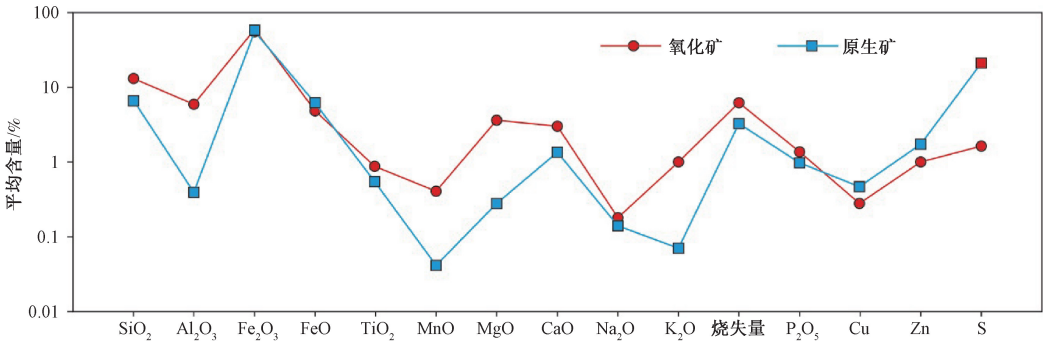


图 4 个旧芦塘坝层间矿中氧化矿和原生矿主量元素平均含量变化曲线图

Fig. 4 Variation curves of average content (%) of major elements in the oxidized ores and primary ores from interbedded orebodies in Lutangba, Gejiu

从层间矿石金属元素在不同中段的含量变化来看（表 1），原生矿中的金属硫化物具有明显的分带性，铜矿化主要分布在下部，锌矿化分布在上部。如铜矿化主要分布在 1630 m 中

段，少数在 1660 m 中段，锌矿化主要分布在 1660 m 中段至 1720 m 中段。从单一原生矿体（如 10-5 号矿体）在不同中段的主量元素含量变化曲线图来看（图 5），从下部到上部，总体

上 CaO 和 P₂O₅ 具有增大趋势, MgO、S 和烧失量具有从小到大再变小的波状变化。从单一氧化矿体 (如 10-5 矿体) 在不同中段的主量元素含量变化曲线图来看 (图 6), 从下部到上部,

总体上 CaO、P₂O₅、K₂O、MnO、Al₂O₃、烧失量均具有明显的增大趋势, Fe₂O₃ 则具有明显的变小趋势。当原生矿发生氧化后, 矿石中的组分也会发生明显的变化。

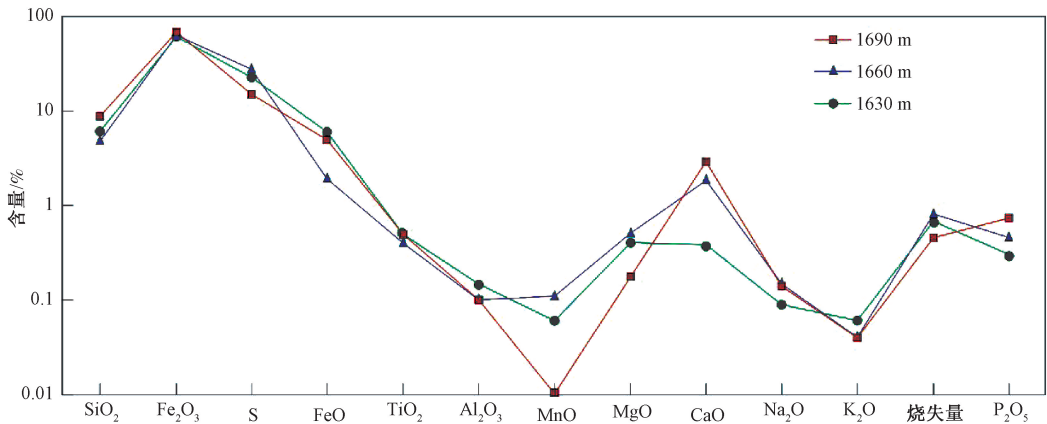


图 5 个旧芦塘坝层间矿 10-5 号原生矿在不同中段中主量元素含量变化曲线图

Fig. 5 Variation curves of content (%) of major elements in the primary ores at different elevations from No. 10-5 orebody in Lutangba, Gejiu

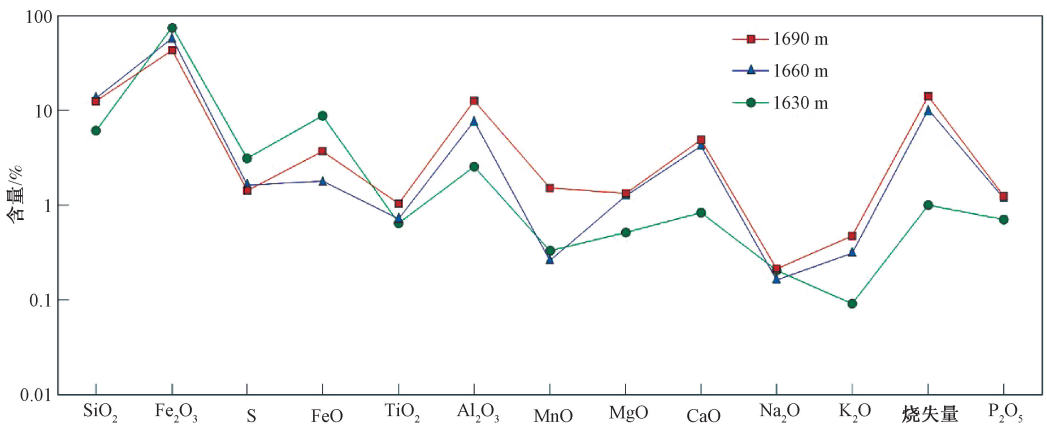


图 6 个旧芦塘坝层间矿 10-5 号氧化矿在不同中段中主量元素含量变化曲线图

Fig. 6 Variation curves of content (%) of major elements in the oxidized ores at different elevations from No. 10-5 orebody in Lutangba, Gejiu

4 讨论

4.1 层间矿成因

个旧芦塘坝层间矿主要产于中三叠统个旧组卡房段第 6 层 (T₂g⁶) 含灰质白云岩层与石灰岩层之间, 该矿石多呈致密块状, 以金属硫化物为主, 主要包括磁黄铁矿、黄铁矿、少量黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等。该矿石中的脉石矿物主要为透闪石和萤石及少量的石英等。由于在层间矿层上部发现了大量的胶状黄铁矿 (图 3f), 因而有学者

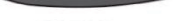
(周建平, 1999; 张欢等, 2007; 黎应书等, 2009) 认为该层间矿与喷流成矿有关。但该胶状黄铁矿的外层多可见较大的气孔, 并呈囊状被磁黄铁矿包裹, 这应该是黄铁矿从高温气熔体中结晶析出后的产物; 同时从不同中段矿石中萤石矿物的含量来看, 上部萤石矿物的含量也相对较高, 而萤石是岩浆气化-热液中重要的指示矿物, 表明成矿时的温度相对较高。同时矿石中含有的透闪石矿物也与喷流沉积成因明显不同, 田毓龙等 (1999) 研究表明, 喷流沉积矿床中通常会有如硅质岩、重晶石等特征的喷流岩。从个旧老厂矿田

塘子凹矿区 1750 m 中段花岗岩与碳酸盐岩的接触带交代岩组成来看,当高温的岩浆期后气化热液交代围岩中的灰质白云岩层后多形成辉石带,交代围岩中的大理岩层后多形成石榴子石带(贾润幸, 2007)。在芦塘坝层间矿中发现的透闪石矿物可能主要与花岗岩体距离较远有关,花岗岩体隐伏标高在 900~1200 m 左右,并在其接触带发现矽卡岩锡铜硫化矿体(朱启金, 2012),层间矿体主要聚集于距花岗岩 300~720 m 的范围内(康德明等, 2016),这造成了岩浆期后气化-热液在上升中必然会混入一定的盆地流体(主要为大气降水),因而当岩浆期后气化-热液优先与白云岩层发生交代作用时形成了透闪石(含水矽卡岩),当然也不排除先形成透辉石后又蚀变为透闪石。酸性成矿热

液在原生硫化矿体顶板围岩形成了酸性热液岩溶作用并导致矿质沉淀,顶板围岩与矿体之间接触界面呈现凹凸不平的光滑界面;在层间矿体底板围岩中,酸性地下水岩溶作用形成了岩溶孔隙和岩溶空洞,并沉淀了次生石膏,它们为新近纪岩溶作用典型构造岩相标志(方维萱等, 2021)。程彦博等(2009)对个旧矿区内花岗岩铅石 U-Pb 定年显示岩浆作用发生的时限为 85~76 Ma。郭佳等(2015)对卡房和老厂两个矿床中的锡石样品进行了原位 U-Pb 定年,结果分别为 84.4 ± 2.0 Ma 和 82.9 ± 2.7 Ma。上述证据都直接或间接地证明了该区层间矿与燕山晚期的岩浆期后气化-热液作用有关,不同阶段的矿物生成顺序可概括如下(表 2)。

表 2 个旧芦塘坝层间矿矿物生成顺序表

Table 2 Mineral formation sequence of the interbedded ores in Lutangba, Gejiu

成矿期次	岩浆气化-热液成矿期			氧化成矿期
成矿阶段	硅酸盐阶段	氧化物阶段	硫化物阶段	碳酸盐阶段
透闪石				
萤石				
石英				
锡石				
黄铁矿(胶状)				
黄铁矿(自形-半自形)				
磁黄铁矿				
黄铜矿				
闪锌矿				
方铅矿				
褐铁矿				
白铅矿				
铅矾				
菱锌矿				
孔雀石				

4.2 层间矿构造-岩相控矿规律

矿体的形成与控矿构造及成矿流体关系密切(王成金和王义强, 1995; 陈宣华等, 2009; 徐兴旺等, 2019),同时也与该区的不同岩相组合密切相关。从个旧芦塘坝地区层间矿的矿体产状和形态来看,矿体主要产于中三叠统个旧组碳酸盐岩层中,可分为缓倾斜和陡倾斜,缓倾斜矿体产于灰质白云岩层和石灰岩层之间,陡倾斜矿体多产于切层的断裂带中。这种岩浆期后气化-热液形成的层间矿体与内蒙古道伦达坝充填在层间破碎带的中等倾斜或陡倾斜的矿体特征较为相似(徐佳佳等, 2009),两者物质组分基本相近,所不同的是前者与碳酸盐岩围岩有交代作用和酸性热液岩溶作用(方维萱等, 2021),后者与粉砂质板岩围

岩没有交代作用。华南大陆中生代以来受华北板块、西南缘特提斯洋以及东部古太平洋板块会聚作用形成了多序次的构造变形(张达等, 2021),孙绍有(2004)通过构造应力场分析认为,高松矿田自中生代以来先后经历了印支期→燕山中晚期→喜山早期→挽近期共四期构造活动,其中第一期的东西向构造带为印支期成矿前构造,第二期燕山中晚期北东向褶皱和断裂为主要的成矿构造。在印支期的成矿前构造中,受南北向挤压作用形成了北西西向的大箐-阿西寨复式宽缓向斜构造,在灰质白云岩层和石灰岩层间形成了缓倾斜的滑脱构造(层间破碎带);在燕山晚期,由于个旧东区深部岩浆沿北东向从南向北的大规模侵位,在上部中三叠统个旧组碳酸盐岩地层中形成了北

东向的五子山复式背斜和芦塘坝等深大断裂及北东东向的104断裂和102断裂及近东西向的131断裂和110断裂等次级断裂(图1),北东东向的芦塘坝大断裂切穿了印支期东西向的层间滑脱构造,使同期的高温高压岩浆期后气化-热液沿北东东向芦塘坝大断裂和北东东向的次级切层断裂带上侵,在层间滑脱构造中形成缓倾斜的层状、似层状矿体,最后在北东东向的芦塘坝断裂和北东东向的104断裂和102断裂及近东西向的131断裂和110断裂中形成陡倾斜矿体。值得一提的是在印支期的成矿前构造中,该地区的岩溶作用也对成矿作用具有重要的影响。从个旧水文地质特征情况来看,在高松矿田沿芦塘坝等断裂均分布有大型岩溶洼地(李良云,2002)。已有研究表明岩溶洼地的形成多与构造关系密切(朱学稳,2009),当酸性地表水沿构造裂隙不断下渗溶蚀碳酸盐岩时,会在碳酸盐岩层中形成穿层的管状落水洞。在马拉格矿田中出现的管状矿体可能与该地区的岩溶作用有关(方维萱等,2021)。所以岩溶作用对成矿前的储矿构造可能具有一定的扩容作用,同时在成矿后,由于岩溶作用形成的贯通地表的岩溶构造,使层间矿体在干旱时发生氧化作用,在雨季时发生淋滤作用,这样又进一步加速了层间矿体边部的氧化,表现为下部的层间矿通常要比上部的氧化程度更高一些,从下部到上部氧化矿 Fe_2O_3 含量具有增大趋势(图6)。

5 结论

(1) 从个旧芦塘坝矿段10号矿群不同中段层间矿体的岩石矿物组构来看,层间矿床中的原生矿体多为块状硫化矿石,金属硫化物主要为磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿等,脉石矿物主要为透闪石、萤石和少量的石英等;原生矿中的金属硫化物具有明显的分带性,铜矿化分布在下部,锌矿化分布在上部。在上部原生矿中可见到早期高温喷气形成的胶状黄铁矿和气孔,下部则多为自形-半自形的黄铁矿。

(2) 通过对不同中段原生矿和氧化矿的对比分析,总体上氧化矿石中除S和FeO含量小于原生矿石外, SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 和烧失量等含量均大于原生硫化矿石。单一原生矿体不同中段的主量元素

分析结果显示,从下部到上部,矿体中的CaO和 P_2O_5 具有增大趋势, MgO 、S和烧失量具有从小变大再变小的波状变化。

(3) 个旧芦塘坝层间矿主要与岩浆期后气化-热液有关。在其与围岩交代过程中,由于有盆地流体的混入而使矿石中形成了含水的矽卡岩矿物(透闪石)等。

(4) 个旧芦塘坝层间矿受构造和岩相控制明显,印支期南北向挤压作用在个旧组灰质白云岩与灰岩之间形成层间滑脱构造(储矿构造),燕山晚期形成的北东东向断裂构造为导矿构造。该地区广泛发育的岩溶作用对成矿作用具有重大影响,在成矿前对印支期形成的储矿构造可能有进一步的扩容作用,在成矿后又加速了层间矿体边部的氧化。

谨以此文庆祝有色金属矿产地质调查中心成立20周年!

References

- CHEN X H, CHEN Z L, YANG N, 2009. Study on regional mineralizations and ore-field structures; building of mineralizing tectonic systems [J]. *Journal of Geomechanics*, 15 (1): 1-19. (in Chinese with English abstract)
- CHENG Y B, MAO J W, XIE G Q, et al., 2009. Zircon U-Pb dating of granites in Gejiu superlarge tin polymetallic orefield and its significance [J]. *Mineral Deposits*, 28 (3): 297-312. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, GUO Y Q, JIA R X, et al., 2021. On relationship between the superimposed mineralization systems and the zoning patterns of vertical tectonic lithofacies in the Gejiu concentration area of Sn-Cu-W and three rare metals in Yunnan [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (4): 557-584. (in Chinese with English abstract)
- GUO J, ZHANG R Q, SUN W D, et al., 2015. LA-ICO-MS U-Pb chronology of cassiterite from Gejiu tin polymetallic deposit, Yunnan province [J]. *Acta Mineralogica Sinica* (S1): 698. (in Chinese)
- JIA R X, FANG W X, HE J, et al., 2004. Geochemical characteristics of trace elements for Tangziwa tin polymetal deposit, Gejiu, Yunnan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 24 (2): 136-142. (in Chinese with English abstract)
- JIA R X, FANG W X, HE Y, et al., 2004. Geochemical characteristics of rare earth elements in Gejiu Tin Polymetallic deposits, Yunnan province, China [J]. *Journal of Rare Earths*, 22 (5): 714-720.
- JIA R X, FANG W X, HU R Z, et al., 2007. Geological and geochemical characteristics of skarns from the Tangziwa tin-polymetallic deposit, Gejiu district, Yunnan province, China [J].

- Geological Review, 53 (2): 281-288. (in Chinese with English abstract)
- JIA R X, FANG W X, HU R Z, 2010. Mineral geochemical compositions of tourmalines and their significance in the Gejiu tin polymetallic deposits, Yunnan, China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 84 (1): 155-166.
- JIN Z D, 1991. Denial of hydrothermal genesis of Gejiu interbedded hematite tin deposits [J]. Geology and Exploration, 27 (1): 19-20. (in Chinese)
- KANG D M, HE K, LI J S, et al., 2016. Spatial occurrence regularity of Ore body in Damalu section of Gaosong ore field of Gejiu tin deposit [J]. Modern Mining (6): 154-157. (in Chinese)
- LI L Y, 2002. On the hydrogeology and controlling factors of groundwater in the east Gejiu Sn orefield [J]. Yunnan Geology, 21 (3): 316-321. (in Chinese with English abstract)
- LI Y S, QIN D X, CHENG X Y, et al., 2009. Evidences of exhalative hydrothermal sedimentary mineralization of indo-Chinese epoch of Gejiu Tin-polymetallic deposits [J]. Nonferrous Metals, 61 (3): 120-125. (in Chinese with English abstract)
- MA D Y, GAO Z M, TAO Y, et al., 2004. The characteristics of ore-controlling structures of the interbedded cassiterite-sulfide deposit, Gaosong ore field, Gejiu, Yunnan [J]. Acta Mineralogica Sinica, 24 (2): 153-156. (in Chinese with English abstract)
- MAO J W, CHENG Y B, GUO C L, et al., 2008. Gejiu tin polymetallic ore-field: deposit model and discussion for several points concerned [J]. Acta Geologica Sinica, 82 (11): 1455-1467. (in Chinese with English abstract)
- PENG Z X, 1992. Discussion on metallogenic model of Gejiu tin deposit [J]. Yunnan Geology, 11 (4): 362-368. (in Chinese)
- QIAN Z K, LUO T Y, HUANG Z L, et al., 2009. Genesis discussion and mineralogical characteristics of "interbedded oxide ore" in Gejiu tin deposit [J]. Acta Mineralogica Sinica, 29 (S1): 549-550. (in Chinese)
- QIN D X, LI Y S, TAN S C, et al., 2006. Metallogenic ages of Gejiu tin ore deposit in Yunnan province [J]. Chinese Journal of Geology, 41 (1): 122-132. (in Chinese with English abstract)
- SUN S Y, 2004. Study on the multi-episodic activity of faults in the Gaosong field of Gejiu tin deposits [J]. Acta Mineralogica Sinica, 24 (2): 124-128. (in Chinese with English abstract)
- TIAN Y L, QIN D X, LIN Y B, et al., 1999. Recent situations and progress of studies on the hydrothermal exhalative sedimentary deposit [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 24 (1): 150-156. (in Chinese with English abstract)
- WANG C J, WANG Y Q, 1995. Experimental study of the principle and regularity governing tectonic stress control of ore deposits [J]. Journal of Geomechanics, 1 (2): 28-34. (in Chinese with English abstract)
- abstract)
- XU J J, LAI Y, CUI D, et al., 2009. Characteristics and evolution of ore-forming fluids of the Daolundaba copper-poly-metal deposit, Inner Mongolia [J]. Acta Petrologica Sinica, 25 (11): 2957-2972. (in Chinese with English abstract)
- XU X W, NIU L, HONG T, et al., 2019. Tectonic dynamics of fluids and metallogenesis [J]. Journal of Geomechanics, 25 (1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, TONG X, WU J D, et al., 2007. Gejiu tin-polymetallic ore deposit: an example of landing of red sea-type submarine hydrothermal deposition [J]. Acta Mineralogica Sinica, 27 (3-4): 335-341. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG D, LI F, HE X L, et al., 2021. Mesozoic tectonic deformation and its rock/ore-control mechanism in the important metallogenic belts in South China [J]. Journal of Geomechanics, 27 (4): 497-528. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU J P, XU K Q, HUA R M, et al., 1999. Discovery of sedimentary fabric and genesis discussion of Gejiu tin deposit [J]. Progress in Natural Science, 9 (5): 419-422. (in Chinese)
- ZHU Q J, 2012. Metallogenesis characteristics & model of interbedded oxidation ore in Damalu Sn orefield, Gejiu [J]. Yunnan Geology, 31 (1): 26-31. (in Chinese with English abstract)
- ZHU X W, 2009. Discussions on Fenglin karst in China [J]. Carsologica Sinica, 28 (2): 155-168. (in Chinese with English abstract)
- ZHUANG Y Q, WANG R Z, YANG S P, et al., 1996. Geology of the Gejiu Tin-copper polymetallic deposit [M]. Beijing: Seismological Press: 1-145. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈宣华, 陈正乐, 杨农, 2009. 区域成矿与矿田构造研究: 构建成矿构造体系 [J]. 地质力学学报, 15 (1): 1-19.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 等, 2009. 与云南个旧超大型锡矿床有关的花岗岩锆石 U-Pb 定年及意义 [J]. 矿床地质, 28 (3): 297-312.
- 方维萱, 郭玉乾, 贾润幸, 等, 2021. 论云南个旧锡铜钨三稀金属矿集区叠加成矿系统与垂向构造岩相学结构的关系 [J]. 地质力学学报, 27 (4): 557-584.
- 郭佳, 章荣清, 孙卫东, 等, 2015. 云南个旧锡多金属矿床锡石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学 [J]. 矿物学报 (S1): 698.
- 贾润幸, 方维萱, 赫英, 等, 2004. 个旧塘子凹锡多金属矿床微量元素地球化学特征 [J]. 矿物学报, 24 (2): 136-142.
- 贾润幸, 方维萱, 胡瑞忠, 等, 2007. 云南个旧塘子凹锡多金属矿床夕卡岩地质地球化学特征 [J]. 地质评论, 53 (2): 281-288.
- 金祖德, 1991. 个旧层间赤铁矿型锡矿热液成因之否定 [J]. 地质与勘探, 27 (1): 19-20.
- 康德明, 何柯, 栗敬书, 等, 2016. 个旧锡矿高松矿田大马芦矿段

矿体空间产出规律 [J]. 现代矿业 (6): 154-157.

李良云, 2002. 个旧锡矿东区地下水水文地质及控制因素 [J]. 云南地质, 21 (3): 316-321.

黎应书, 秦德先, 程细音, 等, 2009. 个旧锡矿区印支期喷流热水沉积成矿的证据 [J]. 有色金属, 61 (3): 120-125.

马德云, 高振敏, 陶琰, 等, 2004. 个旧高松矿田层间锡石-硫化物矿床构造控矿特征 [J]. 矿物学报, 24 (2): 153-156.

毛景文, 程彦博, 郭春丽, 等, 2008. 云南个旧锡矿田: 矿床模型及若干问题讨论 [J]. 地质学报, 82 (11): 1455-1467.

彭张翔, 1992. 个旧锡矿成矿模式商榷 [J]. 云南地质, 11 (4): 362-368.

钱志宽, 罗泰义, 黄智龙, 等, 2009. 个旧锡矿“层间氧化矿”的矿物学特征及成因探讨 [J]. 矿物学报, 29 (S1): 549-550.

秦德先, 黎应书, 谈树成, 等, 2006. 云南个旧锡矿的成矿时代 [J]. 地质科学, 41 (1): 122-132.

孙绍有, 2004. 个旧锡矿高松矿田断裂构造多期活动特征研究 [J]. 矿物学报, 24 (2): 124-128.

田毓龙, 秦德先, 林幼斌, 等, 1999. 喷流热水沉积矿床研究的现状与进展 [J]. 昆明理工大学学报, 24 (1): 150-156.

王成金, 王义强, 1995. 构造应力场控矿原理及控矿规律的实验研究 [J]. 地质力学学报, 1 (2): 28-34.

徐佳佳, 赖勇, 崔栋, 等, 2009. 内蒙古道伦达坝铜多金属矿床成矿流体特征及其演化 [J]. 岩石学报, 25 (11): 2957-2972.

徐兴旺, 牛磊, 洪涛, 等, 2019. 流体构造动力学与成矿作用 [J]. 地质力学学报, 25 (1): 1-8.

张欢, 童祥, 武俊德, 等, 2007. 个旧锡矿-红海型热水沉积登陆的实例 [J]. 矿物学报, 27 (3-4): 335-341.

张达, 李芳, 贺晓龙, 等, 2021. 华南重要成矿区带中生代构造变形及其控岩控矿机理 [J]. 地质力学学报, 27 (4): 497-528.

周建平, 徐克勤, 华仁民, 等, 1999. 个旧等锡矿中沉积组构的发现与矿床成因新探 [J]. 自然科学进展, 9 (5): 419-422.

朱启金, 2012. 个旧大马芦锡矿层间氧化矿矿床特征及成矿模式 [J]. 云南地质, 31 (1): 26-31.

朱学稳, 2009. 我国峰林喀斯特的若干问题讨论 [J]. 中国岩溶, 28 (2): 155-168.

庄永秋, 王任重, 杨树培, 等, 1996. 云南个旧锡铜多金属矿床 [M]. 北京: 地震出版社: 1-145.