

云南者桑金矿地质特征及成因分析

陈少奇, 皮桥辉*

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林
Email: *718084475@qq.com

收稿日期: 2021年1月18日; 录用日期: 2021年2月16日; 发布日期: 2021年2月23日

摘要

云南富宁者桑金矿是我国滇黔桂地区典型的卡林型金矿床之一, 以者桑金矿中三种不同类型的赋金矿石, 即辉绿岩型矿石、泥质板岩或粉砂岩型矿石、泥灰岩型矿石中的载金矿物毒砂和黄铁矿为研究对象, 通过镜下观察和电子探针分析, 对其进行矿物特征观察和地球化学特征分析。研究发现辉绿岩型矿石中细粒自形毒砂、菱形毒砂及破碎状毒砂的尖端含金性较好, 矿化多与硅化和绢云母化有关; 泥质板岩或粉砂岩中粗粒自形五角十二面体黄铁矿和脉状黄铁矿含金性较好, 矿化多与炭化和硅化密切相关; 泥灰岩型矿石中普遍含金, 细粒菱形毒砂的含金性较好, 矿化多与硅化、碳酸盐化及炭化有关。另外结合前人对于者桑金矿矿物包裹体及元素地球化学特征的研究, 综合者桑区域地质特征, 探讨了三种矿体的成因及成矿模式。

关键词

卡林型金矿, 载金矿物, 地质特征, 成因分析

Geological Characteristics and Genesis Analysis of Zhesang Gold Deposit in Yunnan

Shaoqi Chen, Qiaohui Pi*

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi
Email: *718084475@qq.com

Received: Jan. 18th, 2021; accepted: Feb. 16th, 2021; published: Feb. 23rd, 2021

Abstract

Yunnan Funing Zhesang Gold Mine is one of the typical Carlin-type gold deposits in Yunnan, Guizhou and Guizhou regions of my country. There are three different types of gold-bearing ores in Zhesang Gold Mine, namely diabase ore, argillaceous slate or the gold-bearing minerals arsenopyrite and pyrite in siltstone-type ore and marl-type ore are the research objects. Through micro-

*通讯作者。

scopic observation and electron probe analysis, the mineral characteristics and geochemical characteristics of them are observed. The study found that the fine-grained arsenopyrite, rhombic arsenopyrite, and broken arsenopyrite in diabase ores have good gold-bearing tips, and the mineralization is mostly related to silicification and sericitization; argillaceous slate or siltstone is medium-coarse Granular pentagonal dodecahedral pyrite and vein-shaped pyrite have good gold-bearing properties, and mineralization is mostly closely related to carbonization and silicification; marl-type ores generally contain gold, and fine-grained arsenopyrite contains gold. It has good properties, and mineralization is mostly related to silicification, carbonation and carbonization. In addition, combined with previous studies on the mineral inclusions and element geochemical characteristics of the Zhesang gold deposit, combined with the geological characteristics of the Zhesang area, the genesis and metallogenic models of the three ore bodies are discussed.

Keywords

Carlin-Type Gold Deposits, Gold-Bearing Minerals, Geological Characteristics, Genetic Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

卡林型金矿又称为微细浸染型金矿,是世界上极为重要的金矿类型之一,主要产于碳酸盐岩建造中。金的品位一般在 1~14 g/t,储量从十几吨到上千吨不等,并常见有 Ag、Hg、Sb 等元素伴生。我国的卡林型金矿主要集中分布在云南、贵州、广西、湖南、甘肃、四川、陕西等地,形成了滇黔桂、陕甘宁、秦岭及湘中 4 个大型卡林型金矿聚集区[1] [2] [3] [4]。者桑金矿床位于云南省富宁县,地处滇、黔、桂“金三角”成矿区。自 20 世纪 90 年代以来,该矿床的勘查开发工作取得飞速进展,目前该矿床已达到大型金矿床的规模。众多地质学者已经对卡林型金矿开展了大量的研究工作,但研究多集中于成矿时代、成矿环境、成矿物质来源等方面[5] [6] [7],只是在宏观上对该矿床的地质特征取得了基本的认识,而在矿床成因、矿化特征等方面的研究尚有欠缺,本文在已有的工作基础上,尝试从微观上对载金矿物的标型特征及成因特征进行较为系统详尽的研究,通过对三种类型矿石中载金矿物毒砂和含砷黄铁矿的矿物学和地球化学研究,重点探讨者桑金矿床的地质特征、成因分析及成矿规律,以期构建出卡林型金矿的成矿模式,对该地区下一步找矿工作提供有效的参考。

2. 区域地质特征

滇黔桂“金三角”地区位于云南、贵州、广西三省交界,是中国著名的卡林型金矿聚集区。研究区地处云南省富宁县,位于文山-富宁褶皱断裂带的东部(图 1)。区域总体构造线为 NW 向,局部构造线呈 NE 向。总体表现出较为强烈的挤压褶皱,蚀变型的金矿化带多沿着侵蚀面和断裂带发育[8] [9]。

矿区出露地层自下而上为震旦纪-志留纪的碳酸盐岩地层,局部夹少量泥岩和砂岩;泥盆系的灰岩、硅质岩和黑色泥岩;石炭纪的砂页岩、碳酸盐岩和硅质岩;二叠系的泥质岩、碳酸盐岩和硅质岩,并夹有厚度不等的以凝灰质和玄武岩为主的火山碎屑沉积岩;三叠系的陆源碎屑沉积岩,岩性主要为白云质灰岩、页岩夹灰岩、粉砂质粘土岩及碎屑岩。其中,二叠系和三叠系地层是该区主要的赋矿地层。研究区的岩浆岩以二叠纪峨眉山幔柱喷发形成的火成碎屑沉积岩和拉斑玄武岩为主,并可见少量晚中生代的偏碱性基性岩和长英质岩脉发育[10] [11] [12]。

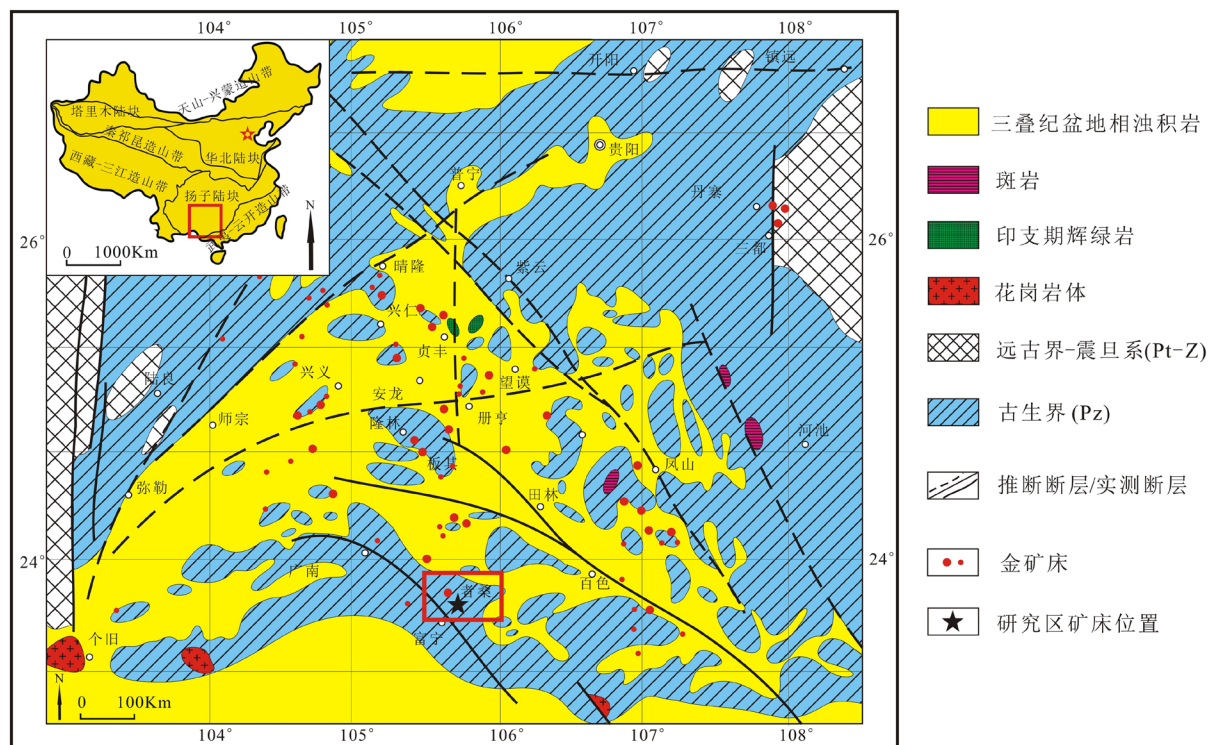


Figure 1. Geological sketch map of Yunnan, Guizhou and Guangxi [10]

图 1. 滇黔桂地区地质简图[10]

3. 矿床地质特征

如图 2 所示, 者桑金矿床区出露地层由老至新分别为上二叠统吴家坪组, 主要为硅质泥岩和凝灰质粉砂岩夹凝灰岩, 局部有灰岩与碎屑岩互层; 下三叠统罗楼组, 主要为白色薄层石英细砂岩夹薄层紫红色泥岩; 中三叠统百逢组, 主要为黄色、灰绿色及紫红色薄层泥岩。矿区位于者桑背斜的南翼, 矿体呈 NE 向近平行排列, 受一系列 NE 向、NEE 向的断裂控制。矿区次级构造极为发育, 很大程度上控制着矿体的产状、分布及形态。矿区出露的主要矿体有 8 个, 其中当属 III、VI、VII 号矿体规模最大。

矿区围岩蚀变及金矿化主要沿着东西向背斜的核部断裂带两侧发育, 矿区内主要矿化有黄铁矿化: 产出晶形主要有五角十二面体、立方体和破碎不规则形。黄铁矿化是本矿床最为重要的围岩蚀变, 因而是卡林型金矿化的重要找矿标志; 毒砂化: 常与黄铁矿化伴生, 普遍发育在矿区的断裂接触带附近, 产出晶形多为菱形、拉长菱形、短柱状、针状等, 近地表大部分已被风化成褐铁矿, 毒砂化也是该矿床重要的围岩蚀变; 褐铁矿化: 多发生在断裂带近地表, 多成细脉状和浸染中, 是由黄铁矿化和毒砂化氧化淋滤后所形成, 部分会保留着黄铁矿和毒砂的晶形; 硅化: 多出现于断裂带附近, 石英脉宽约 10~50 cm, 其附近的矿化一般较好[13]。

4. 采样及分析方法

本次研究是在详细的野外地质勘查工作基础上, 采集者桑金矿的三种含金矿石样品。经手标本鉴定后磨制成光薄片, 在室内显微镜下观察其岩石学和矿物学特征, 再送去进行电子探针显微分析, 电子探针点分析与面分析采用的是广西隐伏矿床勘查中心实验室的 JXA-8230 电子探针分析仪, 标样采用的桂林理工大学地球科学学院电子探针实验室制作的国家标准硫化物矿物标样(毒砂、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、辉镍矿、辉铋矿)。分析所用的加速电压为 20 kv, 束流为 20 mA, 束斑直径为 5.0 μm 。

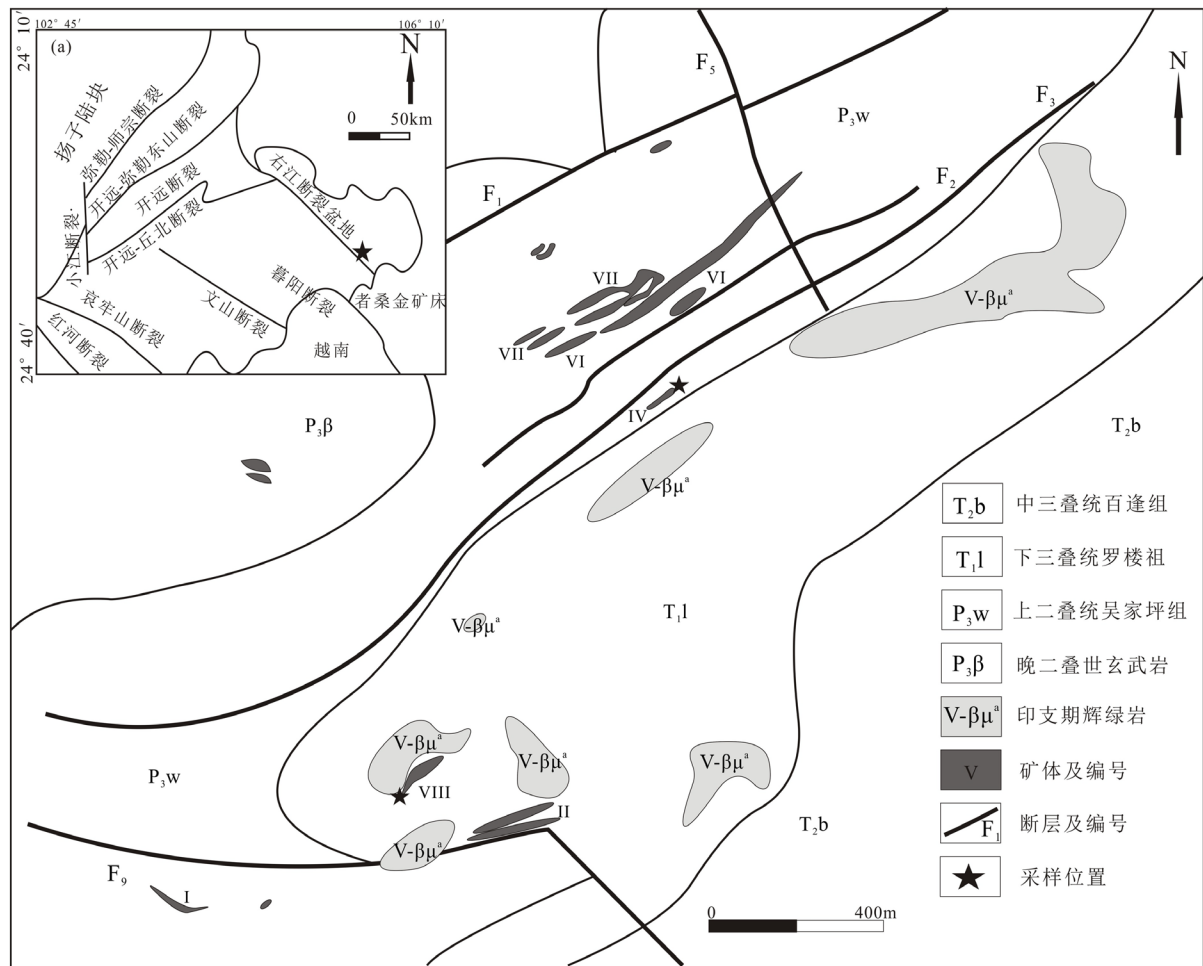


Figure 2. Plane distribution map of ore bodies in Zhesang gold deposit [10]

图 2. 者桑金矿床矿体平面分布图[10]

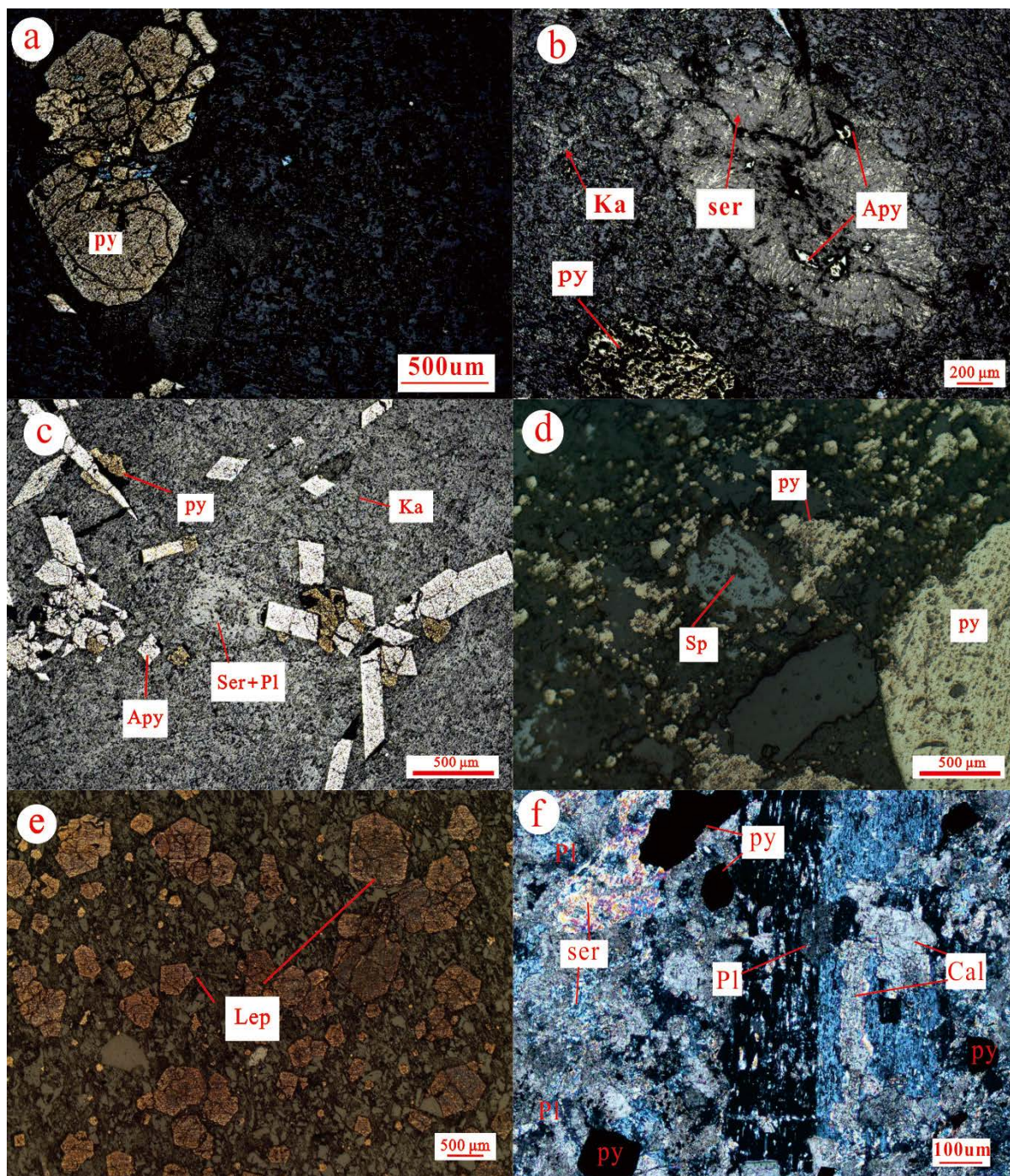
5. 矿石矿物学特征

5.1. 辉绿岩型矿石特征

图 3a: 五角十二面黄铁矿呈破碎状; 图 3b: 胶状黄铁矿周围被粘土化, 菱形毒砂产于鳞片状的绢云母中; 图 3c: 早期自: 形黄铁矿被毒砂交代, 由于矿物蚀变作用强烈, 许多矿物无法辨认, 仅有部分长石保留着原有的长条状结构和聚片双晶结构; 图 3d: 黄铁矿呈破碎状零星分布, 闪锌矿呈现出灰色反射色, 以不规则的形态产出; 图 3e: 五角十二面黄铁矿被氧化成纤铁矿, 同时还保留着黄铁矿的原生五角十二面体假象; 图 3f: 板柱状的斜长石呈现出典型的聚片双晶结构; 部分斜长石被强绢云母化, 随后会演化为泥化; 金属矿物(毒砂和黄铁矿)穿插生长于强绢云母化的长石中。

辉绿岩型矿石中的矿石矿物主要有黄铁矿和毒砂, 还有少量的褐铁矿和闪锌矿。脉石矿物主要有蚀变(粘土化、绢云母化)斜长石、方解石(脉石英(脉)、绢云母等。黄铁矿: 粒径一般为 10~500 μm, 主要为中粗粒破碎五角十二面体结构(图 3a), 部分被针状毒砂交代(图 3c)。少量成矿前期的黄铁矿经历了热液蚀变形成胶状结构(图 3b), 随后又被后期毒砂交代形成骸晶结构; 毒砂: 粒径一般为 10×30~50×1000 μm, 主要为拉长菱形结构, 部分呈微细粒菱形自形结构或超粗粒拉长菱形和针柱状结构(图 3c); 蚀变斜长石: 大部分已被绢云母化和粘土化, 但残留着长柱状或板柱状的晶形(图 3c)。强绢云母化的斜长石在正交偏

光镜下呈现出密集的星点状亮点, 在单偏光镜下呈现出白色或灰白色(图 3f); 斜长石的粘土化多与绢云母化伴生, 两者在长石内部共存时会使斜长石产生节理假像。方解石: 粒径一般为 $30 \times 100 \sim 70 \times 300 \mu\text{m}$, 呈板状或菱面体结构。有一组或两组节理, 部分可观察到聚片双晶结构; 方解石多与石英呈脉状产出, 少量以充填状产出, 形成杏仁状(图 3f)。

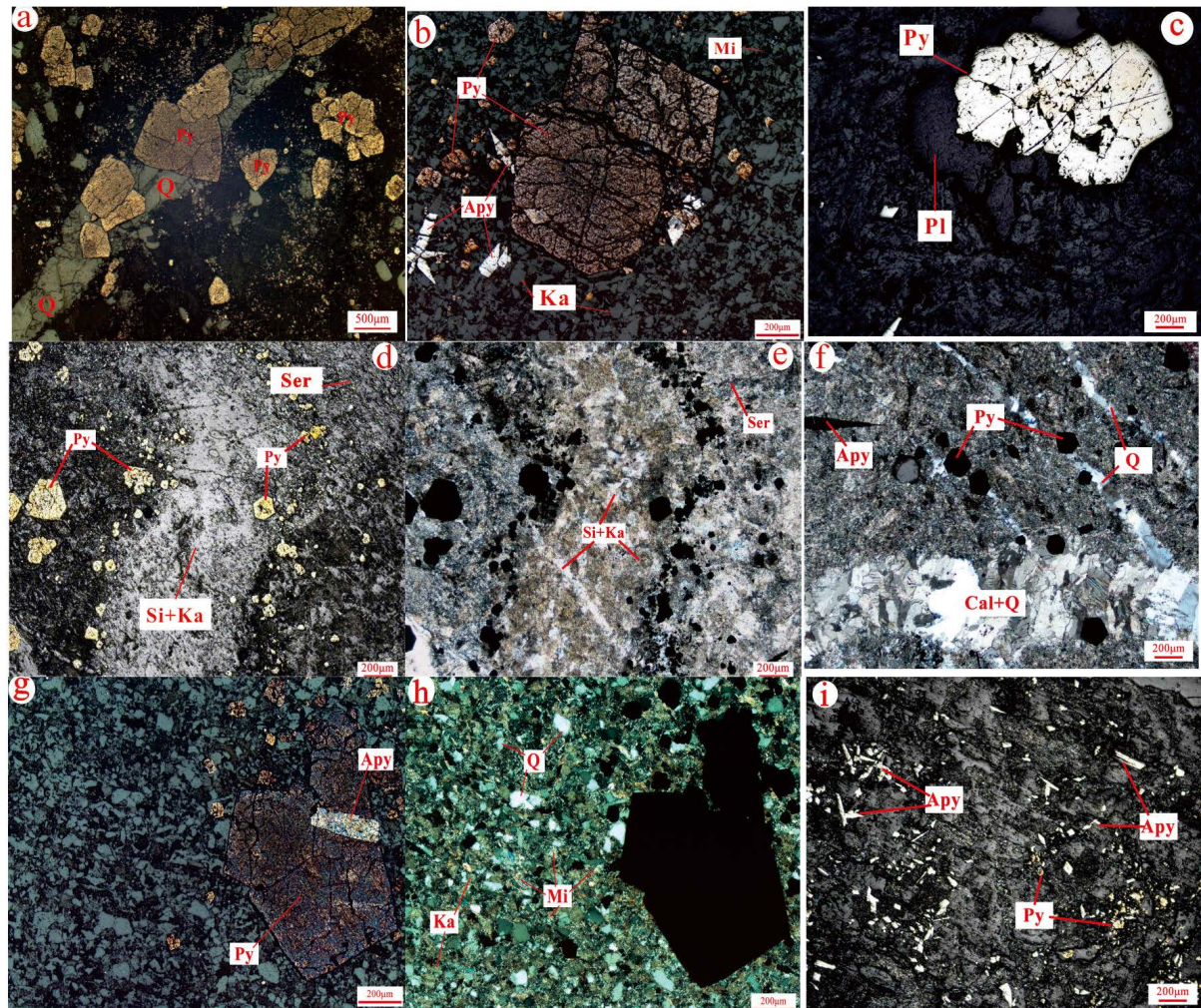


Apy: 毒砂; Py: 黄铁矿; Pl: 长石; Ser: 绢云母化; Ka: 粘土化; Q: 石英; Sp: 闪锌矿; Lep: 褐铁矿; Cal: 方解石(脉)

Figure 3. Mineral characteristics of diabase ore

图 3. 辉绿岩型矿石矿物特征

5.2. 泥质板岩或粉砂岩型矿石特征



Py: 黄铁矿; Apy: 毒砂; Pl: 长石; Ser: 绢云母化; Ka: 粘土化; Q: 石英; Mi: 云母; Cal: 方解石(脉); Si: 硅化

Figure 4. Mineral characteristics of argillaceous slate or siltstone ore

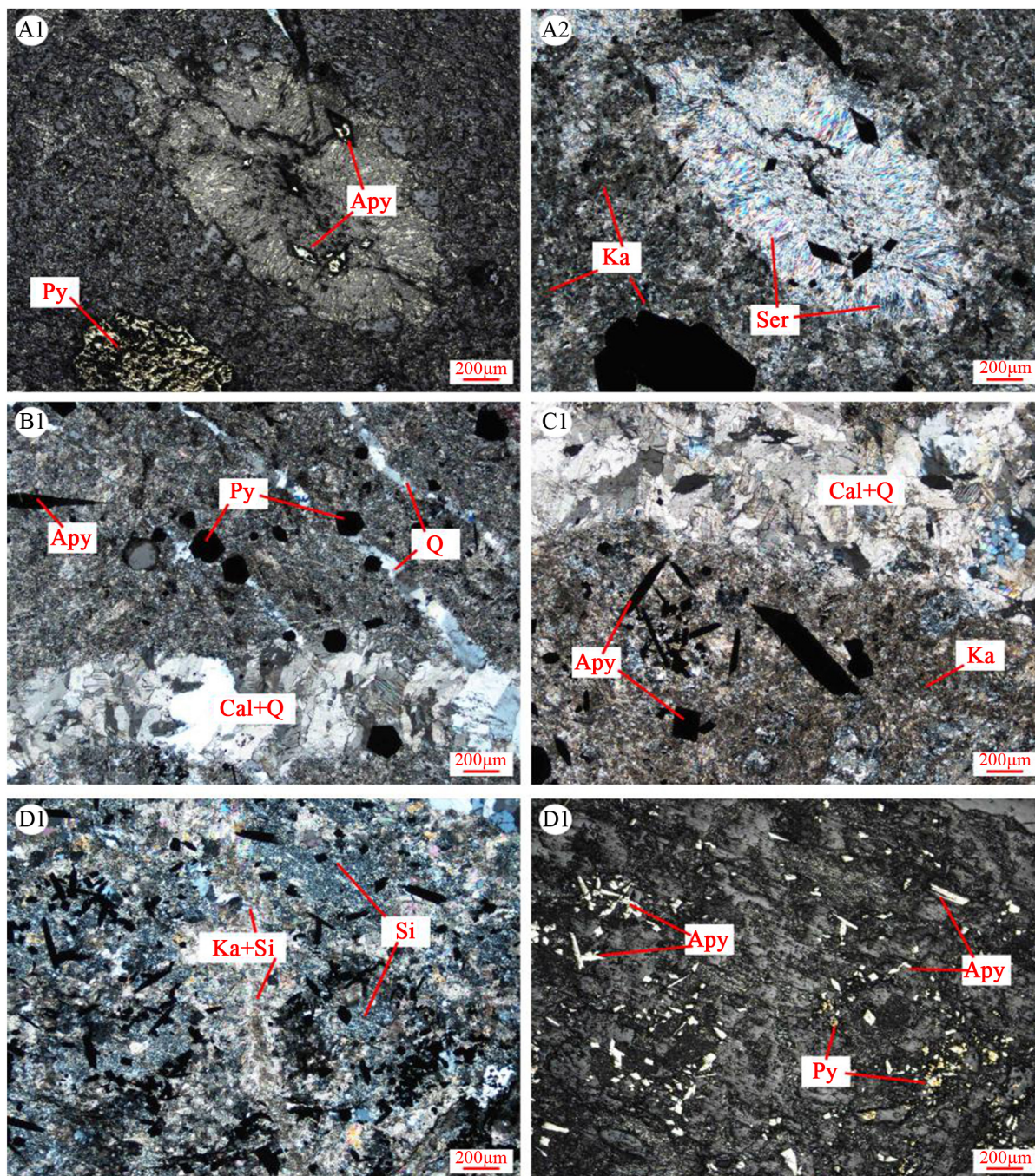
图 4. 泥质板岩或粉砂岩矿石矿物特征

图 4a 中黄铁矿产出形态区别明显, 一种为胶状结构, 推测应为早期黄铁矿; 一种为中-粗粒的五角十二面体和立方体黄铁矿, 推测应与后期的热液活动有关; 图 4b 中的黄铁矿呈破碎状, 推测应为后期挤压所致; 图 4c 中黄铁矿产于长石周围; 图 4d 和图 4e 中细粒黄铁矿以脉状形态产于遭受了硅化和粘土化的蚀变带边缘, 并有石英细脉伴生; 图 4f 中五角十二面体的黄铁矿穿插于石英脉中, 但在相对较粗的石英脉和方解石中很少看到有金属矿物产出; 同时也可以看出石英脉应该先于方解石生成, 两者代表了两期热液活动; 图 4g 和图 4h 中中粒毒砂穿插在粗粒黄铁矿中; 图 4i 拉长菱形毒砂和细粒黄铁矿分布于硅化和绢云母化的边缘。

典型的粉砂岩型矿石主要由毒砂、黄铁矿、粉砂岩、云母、石英、长石等组成。黄铁矿: 反射色一般为暗黄色, 部分呈暗蓝色, 多为中细粒破碎状五角十二面体结构(图 4a); 毒砂: 反射色比黄铁矿较高, 多为亮黄色, 一般为中细粒拉长菱形结构; 石英: 多为杂乱分布的中细粒石英, 部分以石英脉形式产出(图 4b); 褐铁矿、闪锌矿和白铁矿含量较少, 主要产出于黄铁矿的裂隙中, 使其形成骸晶结构或残留结构。泥质板岩或粉砂岩型矿石的炭化也较为普遍。

泥质板岩是辉绿岩到粉砂岩的过渡, 在一些泥质板岩中可观察到斜长石, 部分斜长石还保留着聚片双晶结构; 方解石基本在空隙中以充填状产出, 形成杏仁状结构, 而且一般与石英伴生; 硅化、绢云母化和碳酸盐化普遍存在于泥质板岩中, 与之伴随的矿化也比较强烈。

5.3. 泥灰岩型矿石特征



Py: 黄铁矿; Apy: 毒砂; Q: 石英(脉); Si: 硅化; Ka: 粘土化; Cal: 方解石(脉)

Figure 5. Mineral characteristics of marl ore

图 5. 泥灰岩矿石矿物特征

泥灰岩型矿石主要由黄铁矿、毒砂、石英、方解石、云母组成。图 5-A: 胶状黄铁矿、毒砂和绢云母; 中粒菱形毒砂产于鳞片状的绢云母中; 图 5-B: 中粒五角十二面体黄铁矿穿插于石英脉中, 但方解石和石英脉中较少有金属矿物产出; 同时通过穿插关系可以看出石英脉应先于方解石生成, 二者代表了两期热液活动; 图 5-C: 拉长菱形毒砂产于方解石和石英脉旁的强粘土化部位, 且在其周围有早期石英细脉分布; 图 5-D: 拉长菱形毒砂和细粒黄铁矿在硅化和绢云母化边缘形成“金属圈”, 产出位置粘土化作用强烈。

6. 载金矿物地球化学特征

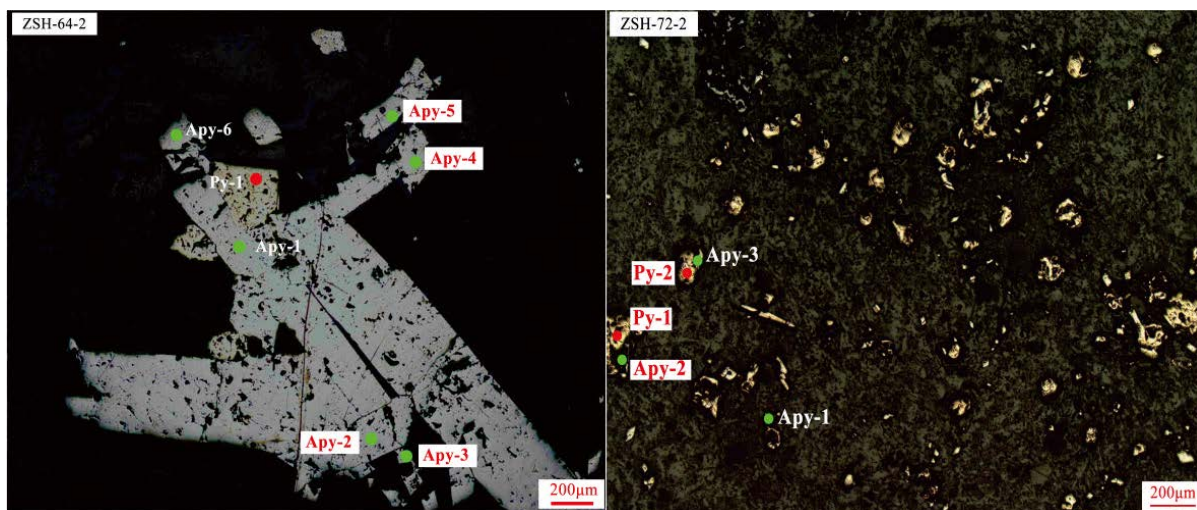
6.1. 载金矿物黄铁矿地球化学特征

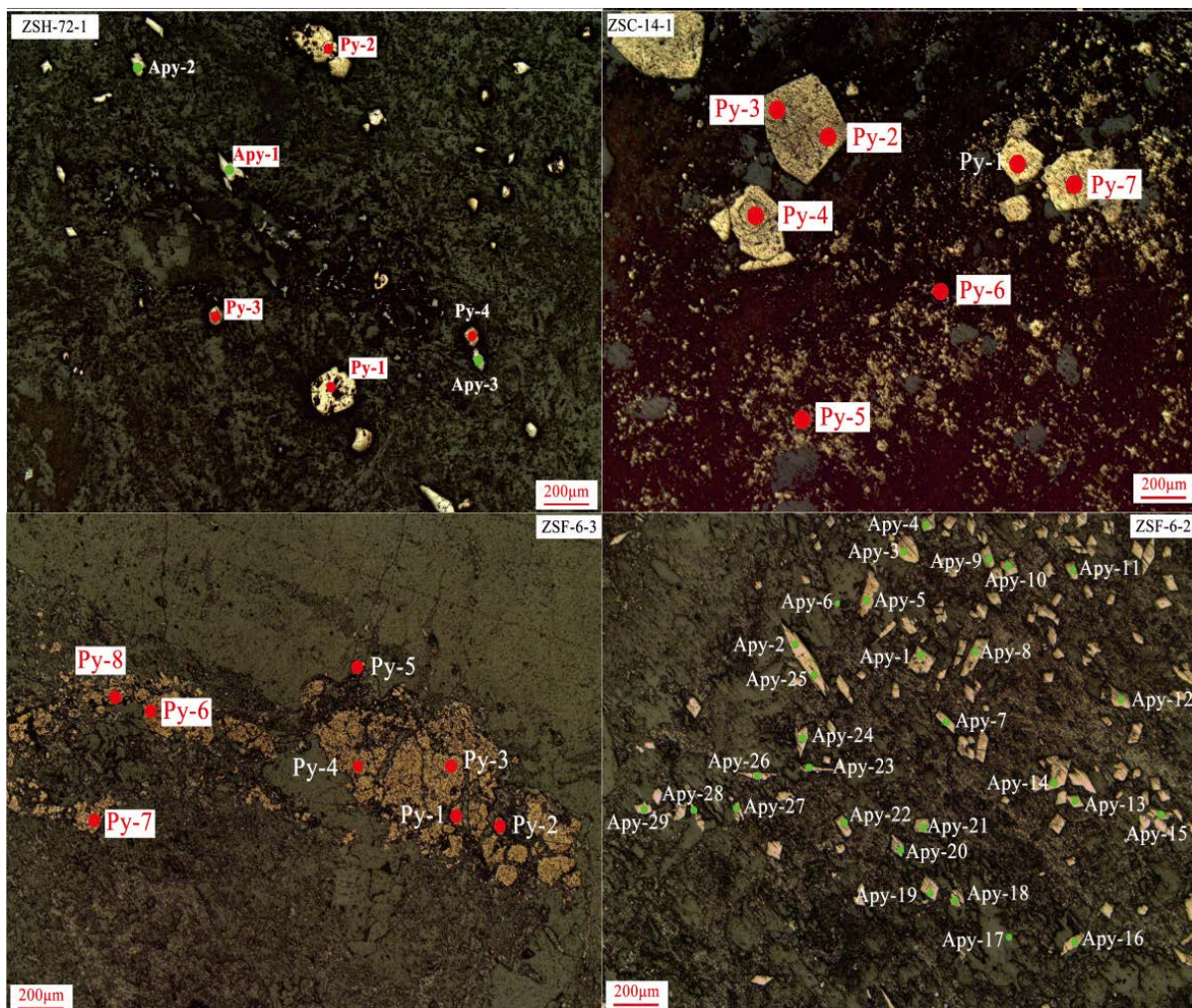
据徐国凤等人[14]研究, 沉积成因黄铁矿的 $w(\text{Fe})$ 和 $w(\text{S})$ 理论值为 46.55% 和 53.45%, 本文(如表 1~3 所示)研究的黄铁矿中 Fe 的含量为 16.5%~87.56%, 平均含量为 47.32%; S 的含量为 10.08%~64.97%, 平均含量为 49.11%。S 的含量低于其理论值的原因可能是黄铁矿中摄入了少量 Au 和 As 等物质, 但具体的原因还需进一步探讨。

不同成因黄铁矿的 Co、Ni 含量及其比值也存在着较大的区别, 王奎仁等[15]通过研究黄铁矿中 Co/Ni 值的特征得出: 沉积成因的黄铁矿 Co/Ni 值远小于 1, 变质热液成因的黄铁矿 Co/Ni 值接近 1, 岩浆热液成因的黄铁矿 Co/Ni 值在 1~5 之间, 火山热液成因的黄铁矿 Co/Ni 值范围较大, 在 5~22 之间[16] [17]。本文研究的泥灰岩型矿石中, 其 Co/Ni 比值在 0.16~3.96 之间, 平均为 1.86 [18], 推断者桑金矿中的黄铁矿经历了除火山热液成因外的其他几种成因。

6.2. 载金矿物毒砂地球化学特征

如表 1~3 电子探针数据所示, 并结合前人关于者桑金矿载金矿物的研究, 发现金在毒砂中的含量相当高。李国等人[19]对毒砂进行电子探针点分析测试显示(如图 6 所示), 在所检测的毒砂点位中, 有一半以上的点高出 Au 检出限, 表明毒砂是金的重要载体矿物及最佳标型矿物。他还认为, 毒砂涉及两个成矿阶段, 在成矿 I 阶段中, 10 个点位有两个点位未检测到金, 金的平均含量为 0.065%; 而成矿 II 阶段中, 7 个点位中仅有两个点位高出检出限, 金的平均含量为 0.018%。因此认为成矿 I 阶段的含金性明显优于成矿 II 阶段。成矿 I 阶段中主要载金矿物为毒砂, 其含金性优于黄铁矿。成矿 II 阶段黄铁矿则为主要载金矿物, 其含金性优于毒砂。值得注意的是, 在毒砂和黄铁矿中, Au 含量高的点 As 含量相对也高, 表明 Au 和 As 具有良好的正相关性。





(红色点为黄铁矿 Py、绿色点为毒砂 Apy, 标红色的电子探针点号为含金点, ZSF-6-2 的毒砂普遍含金, 因此没有进行分别标志)

Figure 6. Three kinds of ore electron probe point map

图 6. 三种矿石电子探针点位图

Table 1. Electron probe data of pyrite (Py) and arsenopyrite (Apy) in diabase ore

表 1. 辉绿岩型矿石中黄铁矿(Py)、毒砂(Apy)电子探针数据

测试点位编号	As	Se	Zn	Ni	S	Au	Co	Fe	Total
ZSH-17-3-1-Apy-1	42.62	0.01	0.24	0.00	22.58	0.0000	0.00	34.14	99.59
ZSH-17-3-1-Apy-2	42.55	0.00	0.00	0.03	21.79	0.0000	0.00	34.22	98.59
ZSH-17-3-1-Apy-3	43.27	0.00	0.00	0.00	23.20	0.0120	0.00	33.86	100.34
ZSH-17-3-1-Py-1	2.40	0.05	0.03	0.00	51.64	0.0000	0.00	46.78	100.89
ZSH-18-3-1-Py-1	1.08	0.00	0.00	0.00	10.08	0.0000	0.08	87.56	98.80
ZSH-18-3-1-Apy-1	30.61	0.00	1.79	0.00	4.00	0.0000	0.39	60.21	97.00
ZSH-18-3-2-Py-1	2.08	0.00	0.00	0.00	54.12	0.0000	0.00	47.23	103.42
ZSH-18-3-2-Apy-2	40.01	0.00	0.00	0.00	24.29	0.0000	0.00	34.91	99.20
ZSH-18-3-2-Apy-1	45.44	0.00	0.00	0.04	23.15	0.0000	0.00	34.30	102.93

Continued

ZSH-64-1-Apy-1	35.90	0.00	0.00	0.02	22.24	0.0000	0.00	41.44	99.59
ZSH-64-1-Apy-2	35.98	0.00	0.02	0.00	22.50	0.0000	0.00	41.31	99.81
ZSH-64-1-Apy-3	36.18	0.00	0.00	0.00	23.13	0.0000	0.00	42.07	101.39
ZSH-64-1-Apy-4	36.16	0.00	0.23	0.00	22.78	0.0000	0.00	41.13	100.30
ZSH-64-1-Py-1	1.57	0.00	0.00	0.00	48.82	0.0000	0.00	49.52	99.90
ZSH-64-1-Py-2	2.13	0.00	0.00	0.02	48.41	0.0000	0.00	49.66	100.21
ZSH-64-2-Apy-1	36.58	0.00	0.12	0.00	21.39	0.0000	0.00	40.90	99.00
ZSH-64-2-Apy-2	33.40	0.00	0.00	0.00	23.59	0.0905	0.00	42.06	99.14
ZSH-64-2-Apy-3	35.65	0.07	0.00	0.00	22.35	0.0476	0.00	41.86	99.98
ZSH-64-2-Py-1	2.24	0.00	0.20	0.01	47.31	0.0000	0.00	49.61	99.37
ZSH-72-1-Apy-01	68.41	0.00	3.31	0.14	17.28	2.1724	0.00	8.10	99.41
ZSH-72-1-Apy-02	70.37	0.00	1.51	0.00	17.46	0.0000	0.00	10.00	99.34
ZSH-72-1-Apy-3	33.22	0.00	0.39	0.00	25.68	0.0000	0.00	40.54	99.83
ZSH-72-1-Py-01	13.31	0.00	0.00	0.67	64.97	0.1227	0.00	20.80	99.88
ZSH-72-1-Py-02	13.89	0.00	9.22	0.44	56.83	0.8889	0.00	16.50	97.78
ZSH-72-1-Py-03	4.55	0.00	0.06	0.00	46.16	0.0329	0.00	49.24	100.04
ZSH-72-1-Py-04	5.55	0.00	0.06	0.02	46.22	0.0000	0.00	49.37	101.22
ZSH-72-2-Apy-1	37.08	0.00	0.31	0.02	22.60	0.0000	0.00	39.88	99.89
ZSH-72-2-Apy-2	39.34	0.00	0.00	0.00	21.98	0.0482	0.00	38.06	99.42
ZSH-72-2-Apy-3	34.91	0.00	0.13	0.04	22.41	0.0000	0.00	42.07	99.56
ZSH-72-2-Py-1	2.59	0.00	0.28	0.01	46.81	0.0357	0.00	50.12	99.85
ZSH-72-2-Py-2	3.09	0.04	0.00	0.00	47.47	0.0035	0.00	49.70	100.30
ZSH-81-1-Apy-1	69.95	0.00	0.00	0.22	17.58	0.0916	0.00	12.05	99.89
ZSH-81-1-Apy-2	70.39	0.00	0.00	0.00	17.16	0.1639	0.00	12.85	100.57
ZSH-81-1-Py-1	7.97	0.00	0.00	0.00	61.17	0.4571	0.00	31.31	100.91
ZSH-82-1-Apy-1	49.98	0.00	0.32	0.01	27.00	0.0000	0.00	22.75	100.06
ZSH-82-1-Apy-2	38.48	0.00	0.00	0.00	22.85	0.0470	0.00	33.79	95.18
ZSH-82-1-Apy-3	36.26	0.00	0.04	0.05	21.58	0.0080	0.00	30.96	88.91
ZSH-82-1-Apy-4	37.44	0.00	0.22	0.28	21.65	0.0000	0.04	32.75	92.38
ZSH-82-1-Py-1	2.89	0.00	0.06	0.04	50.54	0.0140	0.00	45.92	99.45
ZSH-82-1-Py-2	2.94	0.01	0.00	0.01	52.16	0.0000	0.00	47.18	102.30
ZSH-82-2-Py-1	4.53	0.00	0.00	0.00	43.94	0.0000	0.00	45.55	94.02
ZSH-82-2-Py-2	1.03	0.00	0.00	0.02	47.02	0.0000	0.00	46.30	94.36

Table 2. Electron probe data of pyrite (Py) and arsenopyrite (Apy) in argillaceous slate or siltstone type ore
表 2. 泥质板岩或粉砂岩型矿石中黄铁矿(Py)、毒砂(Apy)电子探针数据

测试点位编号	As	Se	Zn	Ni	S	Au	Co	Fe	Total
ZSC-1-1-Py-1	0.00	0.00	0.00	0.02	53.53	0.0000	0.00	47.10	100.66
ZSC-1-1-Py-2	1.07	0.00	0.00	0.00	54.79	0.0180	0.00	47.35	103.23
ZSC-1-1-Py-3	0.85	0.00	0.03	0.00	52.85	0.0000	0.00	47.81	101.53
ZSC-1-1-Py-4	0.19	0.00	0.00	0.00	52.89	0.0080	0.00	47.74	100.83
ZSC-1-1-Py-5	1.35	0.00	0.00	0.00	52.38	0.0140	0.00	47.12	100.87
ZSC-1-1-Py-6	0.38	0.00	0.09	0.00	53.05	0.0030	0.00	47.71	101.23
ZSC-1-2-Apy-1	42.40	0.00	0.13	0.01	22.28	0.0000	0.00	34.40	99.22
ZSC-1-2-Apy-2	41.75	0.00	0.00	0.02	22.16	0.0000	0.00	34.29	98.22
ZSC-1-2-Py-1	0.14	0.00	0.00	0.09	52.05	0.0000	0.00	46.65	98.93
ZSC-14-1-Py-1	2.02	0.05	0.44	0.36	25.55	0.0000	0.00	71.57	100.00
ZSC-14-1-Py-2	0.58	0.00	0.49	0.03	28.79	0.0000	0.00	70.08	99.98
ZSC-14-1-Py-3	0.70	0.00	0.00	0.09	28.71	0.0000	0.00	70.50	100.00
ZSC-14-1-Py-4	0.93	0.00	0.00	0.01	28.78	0.0000	0.00	70.14	99.86
ZSC-23-2-Py-1	1.30	0.00	0.35	0.01	49.09	0.0000	0.00	47.27	98.01
ZSC-23-2-Py-2	3.48	0.00	0.00	0.00	48.79	0.0160	0.00	46.97	99.25
ZSC-23-2-Py-3	2.96	0.00	0.10	0.02	48.61	0.0410	0.00	46.95	98.68
ZSC-23-2-Py-4	0.00	0.00	0.00	0.00	52.12	0.0210	0.00	47.61	99.76
ZSC-23-2-Py-5	2.40	0.00	0.00	0.03	50.03	0.0640	0.00	47.00	99.52
ZSC-23-2-Py-6	3.88	0.00	0.06	0.03	49.92	0.0010	0.00	47.07	100.96
ZSC-23-2-Py-7	0.04	0.00	0.00	0.01	51.14	0.0130	0.00	48.06	99.26

Table 3. Electron probe data of pyrite (Py) and arsenopyrite (Apy) in marl ore
表 3. 泥灰岩型矿石中黄铁矿(Py)、毒砂(Apy)电子探针数据

测试点位编号	As	Se	Zn	Ni	S	Au	Co	Fe	Total
ZSF-6-1-Apy-1	38.68	0.00	0.05	0.00	23.56	0.0000	0.00	33.88	96.16
ZSF-6-1-Apy-2	41.26	0.00	0.03	0.02	20.47	0.0000	0.00	33.37	95.15
ZSF-6-1-Py-1	2.64	0.00	0.09	0.01	51.02	0.0000	0.00	46.83	100.60
ZSF-6-1-Py-2	3.77	0.00	0.00	0.03	51.94	0.0000	0.00	46.21	101.95
ZSF-6-1-Py-3	0.07	0.00	0.28	0.00	53.48	0.0000	0.00	46.46	100.28
ZSF-6-1-Py-4	0.61	0.00	0.06	0.00	52.65	0.0100	0.00	47.57	100.90
ZSF-6-1-Py-5	0.11	0.00	0.10	0.00	52.05	0.0250	0.00	46.28	98.57
ZSF-6-1-Py-6	0.87	0.00	0.13	0.03	52.26	0.0000	0.00	46.50	99.79
ZSF-6-1-Py-7	2.32	0.00	0.00	0.14	52.97	0.0170	0.00	46.15	101.58
ZSF-6-1-Py-8	3.00	0.00	0.00	0.01	49.26	0.0000	0.00	45.61	97.88
ZSF-6-1-Py-9	0.12	0.00	0.00	0.00	53.40	0.0000	0.00	46.66	100.19

Continued

ZSF-6-1-Py-10	3.98	0.00	0.20	0.01	51.14	0.0000	0.00	46.39	101.72
ZSF-6-1-Py-11	0.28	0.00	0.00	0.01	49.95	0.0000	0.00	47.10	97.34
ZSF-6-1-Py-12	3.41	0.00	0.00	0.00	52.23	0.0250	0.00	46.69	102.36
ZSF-6-1-Py-13	1.97	0.00	0.19	0.00	52.32	0.0130	0.00	47.09	101.58
ZSF-6-1-Py-14	3.86	0.00	0.17	0.02	51.14	0.0000	0.00	46.87	102.05
ZSF-6-1-Py-15	2.95	0.00	0.00	0.00	52.40	0.0000	0.00	46.45	101.80
ZSF-6-1-Py-16	1.18	0.00	0.00	0.04	52.40	0.0010	0.00	46.89	100.50
ZSF-6-1-Py-17	3.39	0.00	0.01	0.01	51.35	0.0000	0.00	46.83	101.58
ZSF-6-1-Py-18	3.37	0.00	0.00	0.00	50.19	0.0290	0.00	46.86	100.45
ZSF-6-1-Py-19	5.96	0.00	0.20	0.00	48.81	0.0150	0.00	45.94	100.91
ZSF-6-1-Py-20	3.80	0.00	0.04	0.00	50.72	0.0000	0.00	46.54	101.10
ZSF-6-1-Py-21	3.39	0.00	0.00	0.01	52.53	0.0000	0.00	46.57	102.49
ZSF-6-1-Py-22	4.48	0.00	0.15	0.04	46.12	0.0490	0.00	44.69	95.54
ZSF-6-1-Py-23	0.05	0.00	0.00	0.00	50.99	0.0070	0.00	45.35	96.39
ZSF-6-1-Py-24	0.01	0.00	0.00	0.01	52.26	0.0711	0.00	46.91	99.26
ZSF-6-1-Py-25	4.38	0.00	0.00	0.00	49.54	0.0000	0.00	46.30	100.22
ZSF-6-1-Py-26	0.07	0.00	0.00	0.00	51.82	0.0220	0.00	48.49	100.40
ZSF-6-1-Py-27	4.30	0.00	0.01	0.03	50.30	0.0000	0.00	46.32	100.94
ZSF-6-1-Py-28	3.73	0.00	0.30	0.00	50.72	0.0450	0.00	46.54	101.34
ZSF-6-1-Py-29	4.88	0.00	0.15	0.16	50.02	0.0250	0.00	45.86	101.10
ZSF-6-2-Apy-1	40.69	0.00	0.32	0.05	22.67	0.0390	0.00	34.44	98.20
ZSF-6-2-Apy-2	41.36	0.00	0.00	0.00	21.46	0.0000	0.00	34.46	97.27
ZSF-6-2-Apy-3	40.58	0.00	0.00	0.02	22.79	0.0000	0.00	34.20	97.59
ZSF-6-2-Apy-4	40.76	0.00	0.00	0.01	22.40	0.1100	0.00	34.41	97.69
ZSF-6-2-Apy-5	39.66	0.00	0.12	0.02	22.31	0.1080	0.00	34.44	96.65
ZSF-6-2-Apy-6	40.11	0.00	0.22	0.00	23.27	0.0000	0.00	33.79	97.38
ZSF-6-2-Apy-7	39.65	0.00	0.00	0.00	22.45	0.0620	0.00	34.03	96.18
ZSF-6-2-Apy-8	41.81	0.00	0.00	0.00	23.29	0.0630	0.00	34.31	99.48
ZSF-6-2-Apy-9	40.78	0.00	0.05	0.00	22.93	0.0270	0.00	34.54	98.32
ZSF-6-2-Apy-10	41.98	0.00	0.00	0.00	23.08	0.0910	0.00	34.20	99.36
ZSF-6-2-Apy-11	41.63	0.00	0.00	0.02	21.68	0.0600	0.00	34.33	97.72

7. 讨论

7.1. 矿床成因分析

7.1.1. 辉绿岩型矿体成因

实验研究表明, 在中低温(<250℃)和富 H₂S 的弱酸性热液条件下, Au 主要以 Au(HS)₂⁻ 或 Au(HS)₀ 的

形式迁移[20] [21], 而 As 主要以 H_3AsO_3 的形式存在[22] [23]。金的沉淀富集一般认为与流体岩石的相互作用、流体混合及流体不混溶等过程有关[24] [25] [26] [27]。代鸿章等人[28]对该矿床中的流体包裹体研究表明, 者桑金矿床只发育低盐度(0.3%Na)、中温(254℃)、富含 CO_2-H_2O 的流体包裹体, 缺乏沸腾流体包裹体组合。O-H 同位素组成显示, 成矿流体为变质流体来源, 表明流体不混溶或流体混合并不是该类型金矿中金沉淀富集的关键因素。热力学计算表明, 在中低温(<250℃)条件下, 这种含 CO_2 的成矿流体具有弱酸性(PH =5.07~5. 21) [29]。这种弱酸性的含 Au 热液会使赋矿辉绿岩中的含 Ti-Fe 的辉石溶解并释放出 Fe^{2+} , 为金的沉淀富集和硫化物的形成提供 Fe 的来源, 在溶解 Fe 的硫化作用过程中使含 Au 的毒砂和黄铁矿富集。

7.1.2. 泥质板岩或粉砂岩、泥灰岩型矿体成因

砂泥岩层中含金丰度较高, 一般高于克拉克值数十倍甚至几十倍, 因此认为砂泥岩层是本区该类型矿床的主要矿源层之一[30]。通过对金的伴生元素 Pb、S、C 等稳定同位素的示踪研究以及微量元素特征对比, 表明成矿物质主要来源于矿区附近地层, 即砂泥岩层[31]; 通过对流体包裹体的研究证明[32], 成矿主期都曾加入了岩溶水, 岩溶水的加入带来了灰岩区的矿物质, 破坏了原含矿热液体系的平衡, 促使矿质发生了沉淀。印支期前, 海底火山喷溢作用带来了地球深部的成矿物质, 经海解作用在有利的部位相对富集形成有利的矿源层, 通过对 H-O 同位素的研究表明, 成矿热液既非典型的大气降水, 也非标准的同生水或岩浆水[33], 结合具体地质特征分析, 认为成矿流体为多来源混合水; 通过对矿床周围构造环境分析, 发现砂泥岩位于隆起边缘沉积环境的交换处, 或者说是构造的转换部位, 具备局部富集且能活化迁移的条件, 更有利于金的转生富集。综合区内氢氧同位素及流体包裹体等研究, 认为成矿流体在下渗过程中混合了建造水, 受到岩浆烘烤作用及地温梯度影响后又向上循环, 金矿化发生在成矿流体的热循环与富含有机质的赋矿围岩的相互作用过程中, 并在构造有利部位沉淀富集。

7.2. 成矿模式探讨

滇黔桂地区卡林型金矿成矿作用是极为复杂的过程, 具有多期多阶段叠加改造的特征[10]; 在成矿物质来源上, 矿质、矿化剂和沉淀富集剂等均具有不同的来源[31]; 在成矿空间上, 矿化带与断裂带、层间及不整合面破碎带、断裂与背斜相交切带及基性脉岩带关系密切[32]; 在成矿背景上是扬子地块西南边缘一定演化阶段的产物, 成矿受沉积盆地相带及岩性的控制[33]; 在成矿机制上, 矿源层中矿质的活化、迁移及最终沉淀富集成矿与矿化剂和沉淀富集剂关系密切, 是三者的耦合[34]。矿化剂和沉淀富集剂来源并非单一, 其中有机质的演化和卤族元素及富 S 的流体起到重要作用。

滇黔桂地区卡林型金矿一般产于扬子地块西南缘的晚泥盆世 - 晚三叠世裂陷盆地中, 经历了长期的拉张动力过程。从盆地演化角度来分析, 主要分为三个阶段: 1) 晚泥盆世 - 早二叠世的大陆边缘裂谷阶段, 由于古特提斯洋的打开, 区域性拉张作用加剧, 出现了上泥盆统薄层硅质泥岩和深水硅质岩, 到了早二叠世, 出现了一套由粗到细的陆缘裂谷型沉积建造; 2) 晚二叠 - 早中三叠世的弧后裂谷阶段, 早二叠世晚期地幔柱的上升, 造成广泛的峨眉山玄武岩浆喷溢, 导致上、下二叠统之间的区域不整合, 同时古特提斯洋板块开始向扬子板块俯冲, 形成了哀牢山 - 靖西 - 龙州古岛弧带[35] [36], 导致滇黔桂地区处于弧后大陆裂谷拉张环境。受火山活动影响, 基性岩浆沿着深断裂带侵入和喷发, 将地壳深部或地幔中间等成矿元素携带到地表, 同时高的地温梯度和相对封闭的环境也有利于热卤水的形成和矿物质的迁移、聚集; 3) 晚三叠世盆地萎缩阶段, 由于中三叠世大量超补偿沉积以及印支运动的影响, 晚三叠世沉积盆地范围逐渐缩小, 仅在贵州龙头山发育有晚三叠世沉积, 同时也标志着古特提斯洋的消减和闭合[37]。

滇黔桂地区金矿床的形成模式主要分为矿源层形成期和叠加改造成矿期两个阶段: 1) 矿源层形成期

主要受沉积盆地的岩性、物源区金的原始丰度和供给量、生物有机质的含量三个因素控制。金的选择性沉淀形成了滇黔桂地区 Au、Sb、Hg、As、Tl 等元素高含量背景场和矿源层, 使金等金属元素在局部沉积相带得到预富集; 2) 叠加改造成矿期, 该期可分为两个主要成矿阶段, 即矿物质淋滤和迁移富集阶段、矿物质沉淀富集阶段。淋滤和迁移阶段主要受矿化剂控制, 沉淀阶段主要受沉淀富集剂的控制。在淋滤、迁移富集阶段, 矿化剂选择性的萃取使金形成了络合物, 向泥质隔挡层下部和构造脆弱带富集。随着盆地内 H₂S 流体的分异、幔源基性岩脉沿着构造脆弱带侵入, 再加上有机质热液作用的加强, 进入了沉淀富集阶段, 构造脆弱带中 S、Cl⁻、H₂S、CO₂、CH₄、SO₄²⁻ 等沉淀富集剂的增多和有机质的受热分解改变了物理化学条件, 导致含金络合物稳定性遭到了破坏, 促使 Au³⁺还原为自然金被捕获, 或与沉淀富集剂结合形成硫化物和硫砷化合物而沉淀。卡林型金矿的成矿是一种比较复杂的成矿作用, 其形成受多种因素控制, 其中致使金及其他金属富集的矿化剂和沉淀富集剂及其中的有机质起到关键的作用, 多种因素的耦合是卡林型金矿床形成的必要条件。

8. 结论

1) 通过对载金矿物黄铁矿和毒砂进行镜下观察和电子探针分析可知: 在辉绿岩型矿石中, 细粒自形、破碎状和拉长菱形毒砂的尖端含金量较高, 多与硅化和绢云母化有关; 在泥质板岩或粉砂岩矿石中, 粗粒自形五角十二面体、脉状黄铁矿含金量较高, 多与炭化和硅化有关; 泥灰岩型矿石中细粒菱形毒砂的含金量较高, 多与硅化、碳酸盐化和炭化有关。

2) 三种矿体成因: 辉绿岩型矿体中的辉石被含 CO₂ 的成矿流体溶解释放出 Fe²⁺, 使毒砂和黄铁矿中的 Au 沉淀富集并最终成矿; 而泥灰岩型和粉砂岩、泥质板岩型矿体则主要提供了成矿物质, 使 Au 局部富集并活化转移最终成矿。

基金项目

本文依托国家自然科学基金: 运用独居石和磷钇矿 U-Pb 法精确测定卡林型金矿成矿年龄(41674075)。

参考文献

- [1] 赵世启, 袁波, 陈荔湘, 等. 陕西略阳金家河金矿床地质特征及控矿因素分析[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 120-129.
- [2] 聂爱国. 黔西南卡林型金矿的成矿机制及成矿预测[D]: [博士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- [3] 谭仕敏, 施国栋, 雷良奇, 等. 中国卡林型金矿的分布规律及找矿前景[J]. 地质调查与研究, 2007, 30(4): 289-294.
- [4] 安生婷, 李培庚, 杜生鹏, 等. 青海柴北缘滩间山地区金龙沟金矿成矿模式总结与找矿前景分析[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 99-107.
- [5] 冯建川, 吴建刚. 富宁县金坝金矿地质特征及找矿前景[J]. 四川地质学报, 1992(S1): 51-54.
- [6] 国家辉, 陈树旺, 崔显德. 金坝金矿床地质特征[J]. 地质与资源, 2001, 10(2): 71-79.
- [7] 吴赵全, 王维刚, 何艳丽. 富宁微细浸染型金矿及远景[J]. 云南地质, 2007, 6(1): 49-55.
- [8] 代鸿章. 云南富宁县者桑金矿床成因矿物学研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2012: 1-53.
- [9] 代鸿章, 陈翠华, 顾雪祥, 等. 云南省富宁县者桑金矿床成矿流体特征[J]. 现代地质, 2014, 28(5): 893-904.
- [10] Hu, R.Z., Fu, S., Huang, Y., et al. (2017) The Giant South China Mesozoic Low-Temperature Metallogenic Domain: Reviews and a New Geodynamic Model. *Journal of Asian Earth Sciences*, **137**, 9-34. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.10.016>
- [11] Hu, R.Z., Chen, W.T., Xu, D.R., et al. (2017) Reviews and New Metallogenic Models of Mineral Deposits in South China: An Introduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, **137**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.02.035>
- [12] 熊观, 段威, 唐文春, 杨贵兵, 王焕国, 黄健. 川西北银厂金矿床地球化学特征及成因探讨[J]. 西北地质, 2020,

- 53(4): 86-98.
- [13] 章永梅, 顾雪祥, 摆祥, 等. 云南富宁者桑金矿床硫铅同位素地球化学特征与成矿物质来源[J]. 地学前缘, 2013, 20(1): 32-39.
- [14] 徐国风, 邵洁涟. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 科技述评, 1980, 26(6): 541-546.
- [15] 王奎仁. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1989: 122-125.
- [16] Bajwah, Z.U., Seccombe, P.K. and Offler, R. (1987) Trace Element Distribution, Co: Ni Ratios and Genesis of the Big Cadia Iron Copper Deposit, New South Wales, Australia. *Mineral Deposita*, **22**, 292-300. <https://doi.org/10.1007/BF00204522>
- [17] 苏凤霞, 王晓勇, 贾伟光, 等. 吉林闹枝金矿床黄铁矿的标型特征研究[J]. 黄金, 2003, 24(13): 13-16.
- [18] 李国. 卡林型金矿床金的赋存状态研究——以云南者桑金矿床、贵州水银洞金矿床为例[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2019.
- [19] 李国, 皮桥辉, 韦朝文, 等. 云南者桑金矿床富金矿石类型与地球化学特征研究[J]. 山东国土资源, 2019, 35(3): 8-16.
- [20] 腾建青. 者桑金矿载金矿物的地球化学特征[Z]: [学士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2015: 1-46.
- [21] Seward, T.M. (1973) Thio Complexes of Gold and the Transport of Gold in Hydrothermal Ore Solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **37**, 370-399. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90207-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90207-X)
- [22] Seward, T.M. (1991) The Hydrothermal Geochemistry of Gold. In: Foster, R.P., Ed., *Gold Metallogeny and Exploration*, Blackie, Glasgow, 37-62. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0497-5_2
- [23] Heinrich, C.A. and Eadington, P.J. (1986) Thermodynamic Predictions of the Hydrothermal Chemistry of Arsenic, Cassiterite-Arsenopyrite-Base Metal Sulfide Deposits. *Economic Geology*, **181**, 511-529. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.3.511>
- [24] Pokrovski, G.S., Kara, S. and Roux, J. (2002) Stability and Solubility of Arsenopyrite, FeAsS, in Crustal Fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **66**, 2361-2378. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)00836-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)00836-0)
- [25] Naden, J. and Shepherd, T.J. (1989) Role of Methane and Carbon Dioxide in Gold Deposition. *Nature*, **342**, 793-795. <https://doi.org/10.1038/342793a0>
- [26] Groves, D.I. and Foster, R.P. (1991) Archaean Lode Gold Deposits. In: Foster, R.P., Ed., *Gold Metallogeny and Exploration*, Springer, Berlin, 63-103. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0497-5_3
- [27] Nesbitt, B.E. (1991) Phanerozoic Gold Deposits in Tectonically Active Continental Margins. In: Foster, R.P., Ed., *Gold Metallogeny and Exploration*, Springer, Berlin, 104-132. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0497-5_4
- [28] Hofstra, A.H. and Cline, J.S. (2000) Characteristics and Models for Carlin-Type Gold Deposit. *Reviews in Economic Geology*, **13**, 163-220. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.05>
- [29] 国家辉. 桂西北超微粒型金矿及其成矿和找矿模式[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [30] 国家辉. 桂西北地区岩浆活动与超微粒型金矿化的关系[J]. 地质与资源, 2000, 9(3): 133-143.
- [31] 姚娟, 罗海, 任光明, 等. 云南老寨湾金矿床成矿流体的特征[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(2): 163-167.
- [32] 王臣兴. 广南-富宁地区金成矿带典型矿床及地质特征[J]. 云南地质, 2008, 27(3): 293-301.
- [33] 贾大成, 胡瑞忠. 滇黔桂地区卡林型金矿床成因探讨[J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 378-384.
- [34] 杨海, 陈治安. 黔西南卡林型金矿地质特征及找矿方向[J]. 有色金属设计, 2020, 47(1): 121-123.
- [35] 卢重明. 扬子准地台西南陆缘的活化与右江地槽的形成[J]. 贵州地质, 1986(1): 1-12.
- [36] 段新华. 论哀牢山-藤条河断裂-古板块俯冲带[J]. 地质学报, 1981, 55(4): 258-265.
- [37] 何彬彬, 顾雪祥. 黔桂盆地演化与微细粒浸染型金成矿作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(4): 279-280.