

粤西黄泥坑金矿矿物生成序列: 显微岩相-矿相学及 SEM-EDS 限定*

吴晨光¹, 郑义¹, 林振文², CHRISTOPHER Mbila¹

(1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275;

2. 广东省海洋地质调查院, 广东 广州 510080)

摘要: 黄泥坑金矿为近年在钦杭成矿带南段广宁-罗定断裂带内新发现的金矿, 基础研究几近空白。主要对黄泥坑金矿矿石和围岩进行系统显微岩相-矿相学研究, 并结合 SEM-EDS 形貌和成分分析, 查明其矿物生成序列, 为限定其矿床成因提供证据。研究表明, 黄泥坑含金石英脉型矿体产于绿片岩相变质的寒武系水石组砂岩中, 主要的围岩蚀变为绿泥石化、绢云母化和碳酸盐化。主要矿石矿物包括银金矿、毒砂、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、辉钼矿和硫锑铜银矿等, 主要脉石矿物为石英、绿泥石、绢云母、碳酸盐矿物、金红石、磷灰石、锆石和独居石等。根据矿物相互穿插交代关系和化学成分差异识别出了4个主要成矿阶段: ① 绿泥石-绢云母化阶段; ② 黄铁矿-毒砂-多金属硫化物阶段; ③ 黄铁矿-毒砂-银金矿阶段; ④ 碳酸盐化阶段。其中银金矿呈颗粒状和裂隙状产于黄铁矿和毒砂之间, 主要出现在黄铁矿-毒砂-银金矿阶段。黄泥坑金矿床地质及矿物生成序列与造山型金矿一致, 初步认为黄泥坑金矿为钦杭结合带南段的一个典型的造山型金矿。

关键词: 黄泥坑金矿; 钦杭成矿带; 矿物生成序列; SEM-EDS; 造山型金矿

中图分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2017) 04-0133-12

Mineral sequence of the Huangnikeng gold deposit, Western Guangdong: Constrained by micro-petrographic observation and SEM-EDS analysis

WU Chenguang¹, ZHENG Yi¹, LIN Zhenwen², CHRISTOPHER Mbila¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong Institute of Marine Geological Survey, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The newly-discovered Huangnikeng gold deposit is located in the Guangning-Luoding fault zone, southern section of the Qinzhou-Hangzhou Metallogenic Belt (QHMB). In view of the research blank of this gold deposit, the petrography observation combining with SEM-EDS analysis are applied to obtain its mineral sequences. The wall rock of the Huangnikeng gold deposit is composed of the sandstone of the Cambrian Shuishi Formation with greenschist facies metamorphism including chloritization, sericitization and carbonation. The ore minerals consist of electrum, pyrite, arsenopyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite, polybasite and molybdenite, etc., whilst the gangue minerals are dominated by quartz, chlorite, sericite, carbonate minerals, rutile, apatite, zircon, monazite, etc. Based on minerals cross-cutting relation and mineral assemblage, four main ore-forming stages are identified, including: ① the

* 收稿日期: 2016-07-16

基金项目: 科技部国家重点研发计划 (2016YFC0600506); 广东省自然科学基金 (2016A030310210); 国家自然科学基金 (41502068 和 41402165); 广州市“珠江科技新星”计划 (201710010027)

作者简介: 吴晨光 (1995年生), 男; 研究方向: 岩石矿物学; E-mail: wuchg5@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 郑义 (1984年生), 男; 研究方向: 矿床学; E-mail: zhengy43@mail.sysu.edu.cn

stage A of chloritization-sericitization; ② the stage B of pyrite-arsenopyrite-polymetallic sulphides; ③ the stage C of pyrite-arsenopyrite-electrumc; ④ the stage D of carbonatization. The most important economic mineral is electrum of the stage C distributed in particles and fractures of pyrites and arsenopyrites. The geological characteristics and mineral sequences of the Huangnikeng deposit are accordant to the global orogenic-type gold deposits. Therefore, the Huangnikeng gold deposit can be considered as an example of orogenic-type gold deposit in the southern section of QHMB.

Key words: Huangnikeng gold deposit; Qin Zhou-Hangzhou Metallogenic Belt (QHMB); mineral sequences; SEM-EDS analysis; orogenic-type gold deposit

钦杭成矿带是华南地区重要的 Au-Ag 多金属成矿带^[1-7], 发育了河台金矿、长坑-富湾金银矿、庞西垌银金矿和金山金矿等多个大型造山型金银矿床^[8-12]。钦杭成矿带在印支-燕山期大规模挤压造山运动中形成了一系列逆冲推覆构造和韧性剪切带^[3], 为造山型金矿提供了有利的成矿条件。造山型金矿被普遍认为形成于造山作用及此后的伸展转换过程^[13-16], 富含 CO₂、低盐度的变质流体成矿^[17-19], 矿体以位于绿片岩相变质岩层中的石英脉体为主^[20], 受韧性剪切带等构造控制^[13]。造山型金矿具有典型的矿物蚀变组合, 以碳酸盐矿物+硫化物±绢云母±绿泥石为主^[21-22], 其中硫化物矿物≤3%~5% (主要为铁的硫化物, 以毒砂和黄铁矿、磁黄铁矿最为常见), 碳酸盐矿物≤5%~15%^[13]。

矿物组合在判定矿床类型时至关重要, 因为它包含了地质条件、成矿期次、物理化学条件等关键信息。不同的矿床类型具有不同的矿物组合特征, 作为基本的地质特征有时却能提供更全面的认识。例如, 浅成低温热液型金矿中会出现明矾石或冰长石这样的典型矿物, 而在造山型金矿中则不会出现。文献 [23] 和 [24] 根据地球化学特征认为, 滇西大坪金矿属于典型的造山型金矿。但文献 [25] 等则根据矿物组合发现, 大坪金矿的矿床基础地质特征与典型造山型金矿不符而与浅成低温热液型一致, 据此提出了大坪金矿“深部造山型+浅部低温热液型”的成矿模式组合。由此可见, 矿物组合仍是了解矿床成因的不可或缺的手段。

黄泥坑金矿已探明矿石储量在 20 t 以上, 品位达 12.96 g/t, 被认为是一个浅成低温热液型金矿^[26]。但黄泥坑金矿的地质背景和矿物特征与典型的浅成低温热液矿床有明显的差别。鉴于此, 本文主要对黄泥坑金矿的矿石和围岩进行了系统的显微岩相-矿相学研究, 并结合 SEM-EDS 形貌和成分分析, 以期得出该矿床系统的矿物生成序列, 旨在加深对该矿床成因类型的认识。

1 区域及矿床地质

区域内主要发育震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、三叠系、白垩系及第四系地层, 产出加里东期 (~423 Ma)^[27]、海西-印支期 (~236 Ma)^[27] 和燕山期 (165~150 Ma)^[28] 花岗岩 (图 1)。其中震旦系和寒武系地层是区域内金矿最主要的产出层位。黄泥坑金矿即产出于寒武系八村群水石组, 该地层为一套厚约 2 000 m 的黑色炭质砂页岩浅变质岩系, 岩性以石英砂岩粉砂岩为主^[26], 走向 NE, 倾向 SE, 倾角 50°~60°, 具 Au、Ag、Pb、Zn、Cu 高背景值^[26]。

黄泥坑金矿位于钦杭成矿带南段, 云开褶皱带东缘, 处于典型的造山带构造环境。区域发育大型 NE 向韧性剪切带, 形成于绿片岩相中温中压条件下, 时间被限定在 213~187 Ma^[29-30], 以广宁-罗定断裂和吴川-四会断裂为代表。其中广宁-罗定断裂是黄泥坑金矿的控床断裂 (图 1), 这是一条 NE 走向, 长 200 km, 宽 10~15 km 的大型韧性剪切变质变形带^[29], 由多条平行侧列的断裂带和挤压破碎带、糜棱岩化带、片理化带、角砾岩及混合岩化带等组成^[26], 被认为形成于钦杭结合带印支期挤压造山事件^[31], 最终在燕山晚期发展为右行韧-脆性剪切带^[29]。

黄泥坑金矿含金石英脉型矿体以充填成矿作用就位于矿区内的 NE 向断裂, 是典型的热液脉状后生金矿床。已发现矿脉约 25 条, 大致呈雁列式展布, 其延伸方向以 NE 向为主, 倾向 NW, 倾角 70°左右^[26]。少量脉展布为 NW 向, 倾向 SW, 倾角陡倾, 矿体规模较小。此外还有 EW 向和 NS 向两组矿脉, 但矿脉规模都很小。矿区内金矿脉长度差异大, 介于 100~700 m 之间, 大多数矿脉为 200~300 m, 且矿体的侧伏明显^[26]。

黄泥坑金矿赋矿围岩为寒武系水石组浅绿色绿片岩相变质石英砂岩, 白色石英矿脉呈定向和共轭状贯入围岩并发生矿化。其中以多金属硫化物矿化

为主，其次为银金矿化。常见矿石矿物有银金矿、黄铁矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、硫锑铜银矿和辉钼矿等。围岩蚀变主要为绿泥石化、绢云

母化和碳酸盐化，蚀变分带不明显。主要脉石矿物有石英、绿泥石、绢云母和碳酸盐矿物（图 2）。

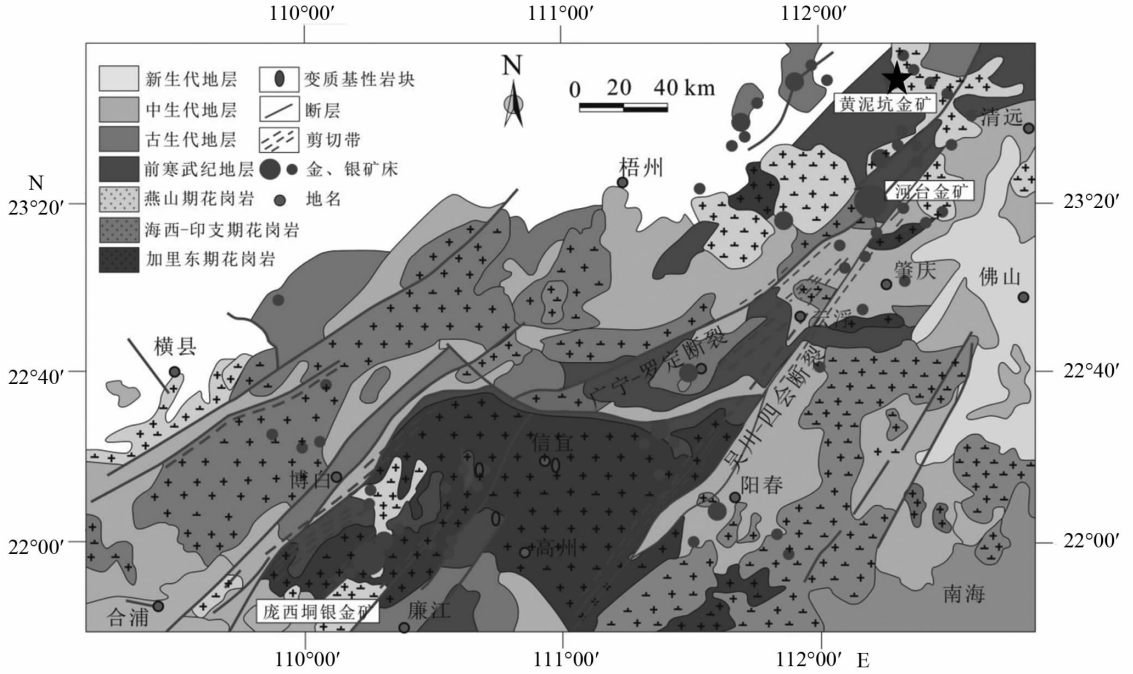


图 1 粤西地区构造与矿产分布图（据参考文献 [26] 修改）

Fig. 1 The geological map of regional structures and deposits in western Guangdong (Modified from [26])

2 采样和实验方法

所有的岩矿标本均取自同一矿脉。首先选取岩石样品磨制成薄片和光片，置于光学显微镜下进行岩相学 - 矿相学观察。主要记录矿物的种类、形态大小、结晶程度以及矿物结构。然后在光片表面喷上碳层，在中山大学地球科学与地质工程学院的场发射扫描电镜实验室进行 SEM - EDS 分析。其中背散射扫描 BSD、阴极发光 CL 用于矿相观察，X 射线能谱扫描用于成分检测。所用仪器为场发射 ZEISS ΣIGMA & OXFORD X - MAX 020，实验电压为 15 kV，能谱束斑直径为 2 μm，检出限为 0.1%。

3 实验结果

3.1 显微岩相 - 矿相学研究

光学显微镜可见矿石矿物有银金矿、黄铁矿、毒砂、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、硫锑铜银矿、辉钼矿等，脉石矿物为石英、绿泥石、绢云母和碳酸盐矿物。

3.1.1 矿石矿物

1) 银金矿：银金矿是主要的富金矿物，呈颗粒

状和裂隙状（图 3e, 3f）出现在黄铁矿和毒砂的裂隙之中，而在其他位置少有银金矿的产出。

2) 黄铁矿：矿石矿物中黄铁矿含量最高。按照反射色、形态、粒度、结晶程度、矿物结构的差异，这些黄铁矿可分为 4 种类型（图 3）。为方便讨论，分别将其命名为图 3a 中的 I 型（白色反射色，表面光滑，粒径 100 ~ 700 μm，自形或他形，常呈五角十二面体，常含石英包体产于围岩中），图 3c 中的 II 型（黄色反射色，表面光滑，粒径 > 700 μm，自形至他形，常呈立方体，常与方铅矿、闪锌矿交代、共生），图 3d 中的 III 型（淡黄色反射色，表面粗糙，粒径约 200 μm，自形，常呈立方体，常与 II 型毒砂共生）和图 3e 中的 IV 型黄铁矿（淡黄色反射色，表面光滑，粒径数十至数百微米，自形至他形，常呈连晶，常与 III 型毒砂共生，赋存银金矿）。其中 IV 型黄铁矿与银金矿关系密切，银金矿产于其孔洞和裂隙中（图 3e）。

3) 毒砂：毒砂含量仅次于黄铁矿，可划分出 3 种类型（图 3）。为方便讨论，分别将其命名为图 3b 中的 I 型（粒径数百微米，自形，单颗粒产于围岩中），图 3d 中的 II 型（粒径可达 1 mm，自形，

与 II 型黄铁矿共生) 和图 3e, f 中的 III 型毒砂 (大小不一, 自形或他形, 集中产出, 与 IV 型黄铁矿共生)。其中 III 型毒砂交代 IV 型黄铁矿, 可见部分毒

砂围绕 IV 型黄铁矿边缘甚至在黄铁矿内部呈他形或半自形生长, 银金矿亦出现在 III 型毒砂裂隙之中 (图 3f)。

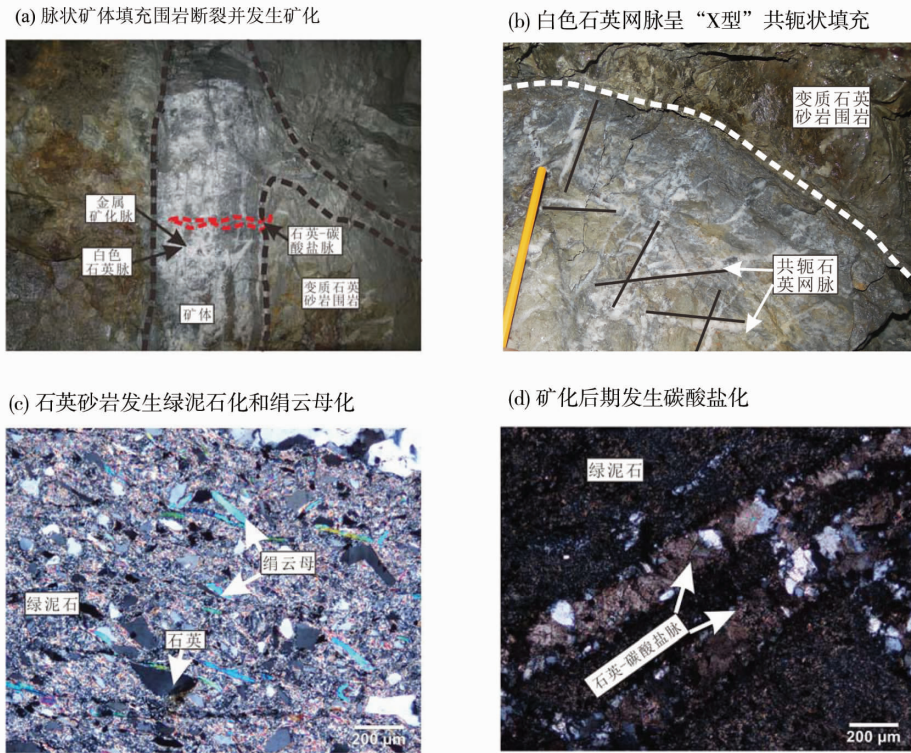


图 2 黄泥坑金矿矿化及围岩蚀变

Fig. 2 Mineralization and wall rock alteration in the Huangnikeng gold deposit

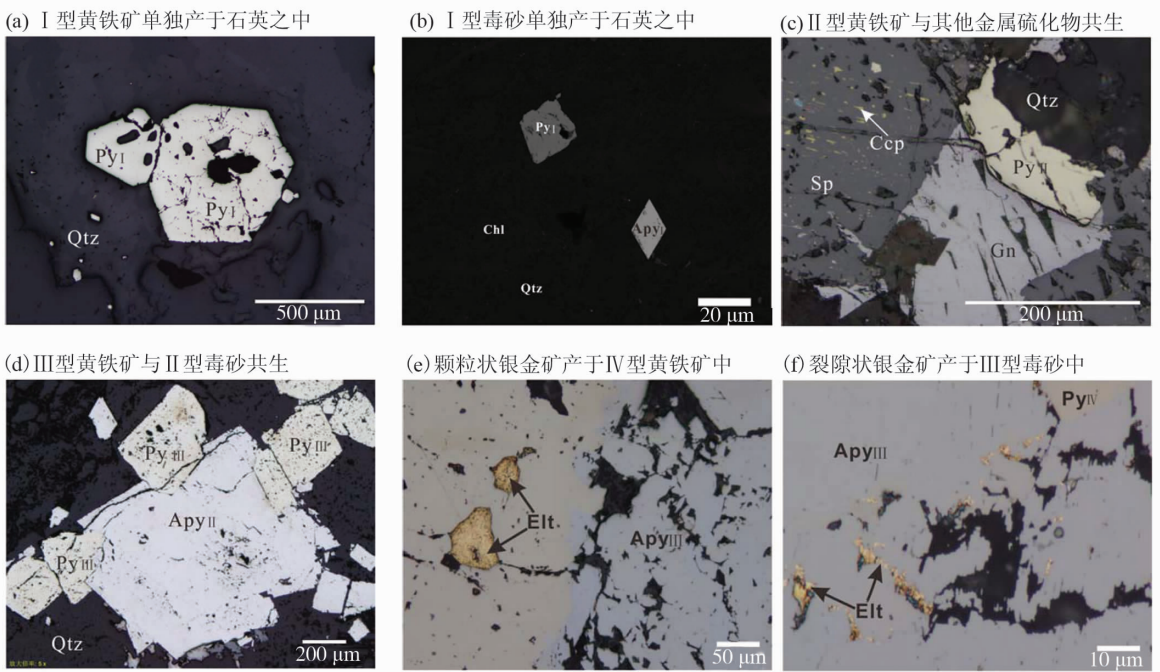


图 3 矿相显微镜下的黄铁矿、毒砂及银金矿

Fig. 3 Microphotograph of pyrites, arsenopyrites and electrums

Qtz 为石英; Chl 为绿泥石; Py I - IV 为 I - IV 型黄铁矿; Apg I - III 为 I - III 型毒砂; Gn 为方铅矿; Sp 为闪锌矿, Ccp 为黄铜矿; Elt 为银金矿

4) 多金属硫化物：硫化物除黄铁矿和毒砂外，还包括闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、硫锑铜银矿、辉钼矿等。这些多金属硫化物常表现为共生关系（除辉钼矿外）（图 4），如：闪锌矿与方铅矿的共结边结构（图 4a），闪锌矿与黄铜矿的定向乳浊状结构（图 4b）以及多种金属硫化物组成的共生系统（图 4c - e）等。辉钼矿为灰褐色板状，颗粒细小，受应力发生弯曲（图 4f），单独出现在围岩中而不与其他金属硫化物共生。

3.1.2 脉石矿物 石英可分为变质石英砂岩中波状消光的石英 I 和白色网脉状含矿石英 II。石英的特征显示金矿系统主要处于挤压环境下。碳酸盐矿物则呈脉状、梳状，颗粒粗大，表明矿化晚期转为受拉伸环境控制。石英 II 白色网脉穿插变质石英砂岩，碳酸盐细脉则存在于前两者之中。这证明网脉状石英明显形成于绿泥石化之后，并在晚期发生了碳酸盐化（图 5）。

3.2 扫描电镜及能谱分析

3.2.1 矿石矿物

1) 银金矿：文献 [26] 在研究中认为黄泥坑金矿中 Au 元素以自然金和不可见金的形式存

在^[26]。然而 SEM - EDS 分析显示黄泥坑金矿中的 Au 元素以银金矿（图 6a, b）的形式出现，既非自然金又无不可见金。其中银金矿普遍含有 As, Fe 元素（图 6b），Au 和 Ag 的原子比接近 1（表 1）。同时，利用 X 射线能谱仪对黄铁矿、毒砂和银金矿共存的体系进行线扫描（图 6c）和面扫描（图 6d），结果表明 Au 在黄铁矿和毒砂中并未以不可见金形式存在，且无 Au 的过渡性变化，证明无 Au 元素从黄铁矿或毒砂中迁移富集的行为。

2) 黄铁矿：黄铁矿类型的不同与其化学成分有密切的关系。利用 X 射线能谱仪对 4 种黄铁矿进行主量成分分析，发现其中含 As 量有明显的变化（表 2，图 7）。同时，几乎所有的黄铁矿都表现出较弱的亏硫特征（表 2）。

3.2.2 脉石矿物 扫描电镜分析显示脉石矿物包括重砂矿物，如金红石、磷灰石、锆石、独居石。这些矿物以极细的颗粒、呈点状分布于变质砂岩之中（图 8a），其中以金红石含量相对较高。磷灰石、锆石、独居石含量很低，颗粒更为细小，其中锆石发育环带（图 8d）。

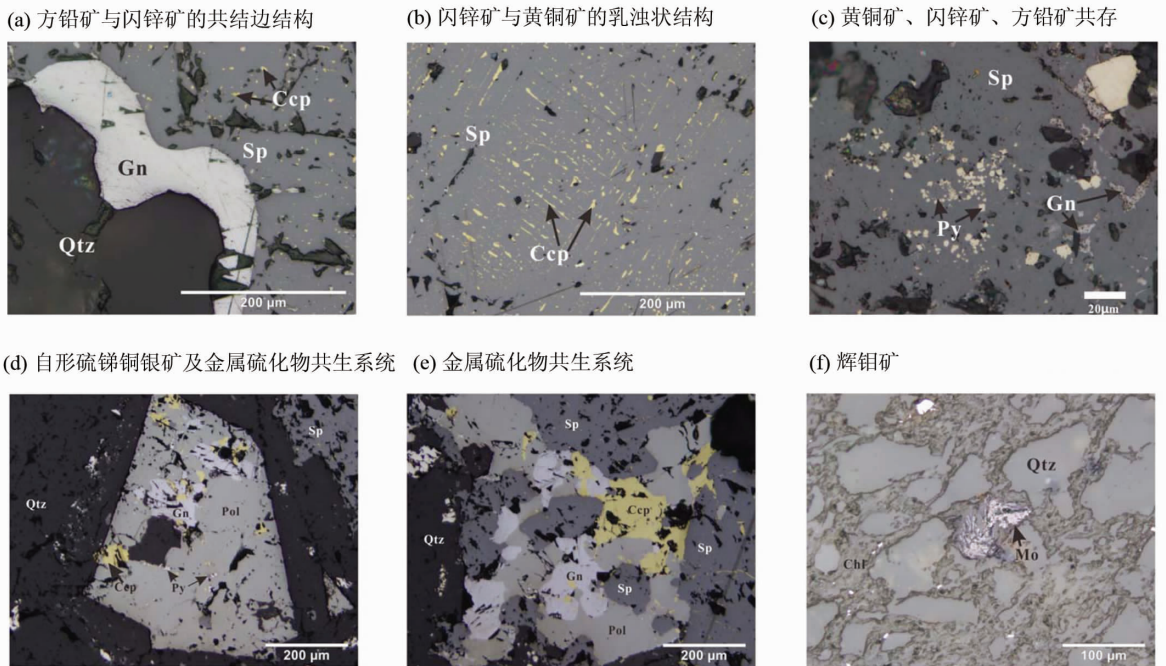


图 4 矿相显微镜下各种不同的硫化物及其接触关系

Fig. 4 Microphotograph of different kinds of sulphides and their textures

Qtz 为石英；Chl 为绿泥石；Apy 为毒砂；Py 为黄铁矿；Gn 为方铅矿；Sp 为闪锌矿；Ccp 为黄铜矿；Pol 为硫锑铜银矿；Mo 为辉钼矿

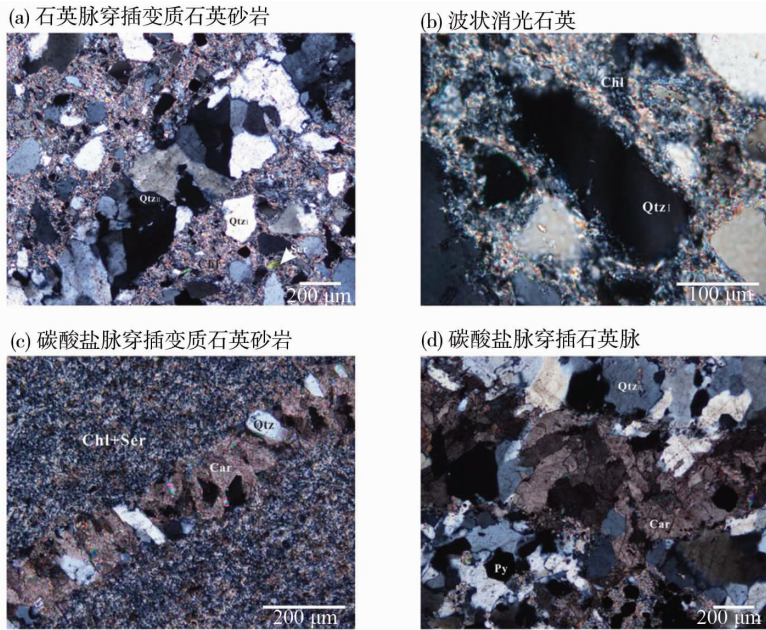
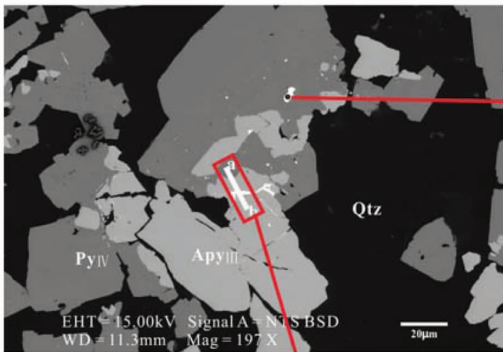


图 5 脉石矿物及其穿插关系

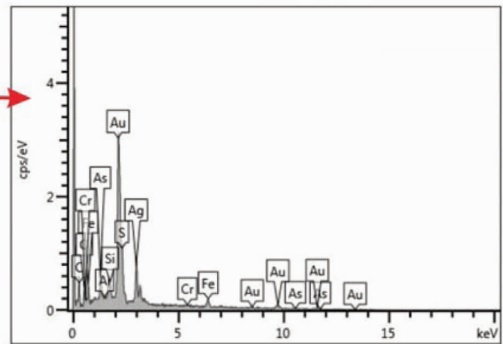
Fig. 5 Gangue minerals and their relationship

Qtz I 为变质石英砂岩中的石英颗粒; Qtz II 为后期脉状石英; Chl 为绿泥石; Ser 为绢云母; Car 为碳酸盐矿物; Py 为黄铁矿

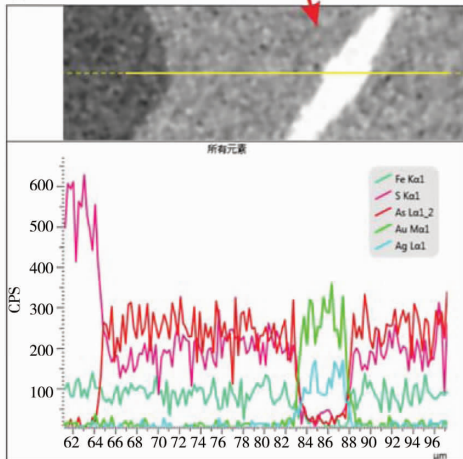
(a) 背散射电子下的银金矿



(b) 银金矿 X 射线能谱



(c) X 射线能谱线扫描分析



(d) X 射线能谱面扫描分析

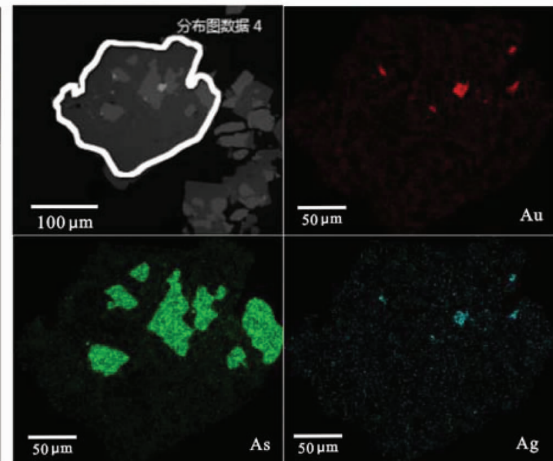


图 6 扫描电镜下的银金矿及其 X 射线能谱分析

Fig. 6 BSE images and X-ray energy spectrum analysis of electrum

Qtz 为石英; ApyIII 为 III 型毒砂; PyIV 为 IV 型黄铁矿; Elt 为银金矿

表 1 银金矿主量元素含量¹⁾

Table 1 Main elements of electrum by EDS at the Huangnikeng gold deposit

样品	点号	原子百分数 $x(B)/\%$									$\frac{x(Au)}{x(Ag)}$
		Au	Ag	As	Fe	Cr	S	Si	Al	Total	
HNK-40	1	27.11	26.46	4.67	10.73	1.38	22.47	6.83	0.33	100.00	1.02
	2	31.50	31.09	1.03	8.47	0.01	22.41	3.96	1.53	100.00	1.01
	3	26.67	26.79	0.24	10.83	1.46	31.68	1.72	0.61	100.00	1.00
	4	26.84	26.52	0.59	9.14	n. a	33.20	3.08	0.63	100.00	1.01
HNK-40	1	27.74	24.37	0.80	8.41	0.79	25.91	7.04	4.93	100.00	1.14
	2	21.98	22.90	0.79	10.79	7.52	32.47	3.17	0.38	100.00	0.96
	3	32.39	19.40	5.29	10.08	n. a	27.89	4.29	0.66	100.00	1.67
HNK-40	1	21.49	22.55	2.43	13.25	3.68	35.25	1.35	n. a	100.00	0.95
	2	28.89	26.23	4.25	8.05	0.58	20.13	11.52	0.36	100.00	1.10
	3	29.79	27.11	3.03	8.31	0.66	22.73	7.65	0.71	100.00	1.10

1) n. a 表示“未检测出”，原子百分含量低于 0.1%

表 2 四种类型黄铁矿的主量元素含量¹⁾

Table 2 Main element contents in four types of pyrite by EDS at the Huangnikeng gold deposit

黄铁矿	点号	$x(B)/\%$				$\frac{x(S)}{x(Fe)}$
		Fe	S	As	Total	
Py I	1	34.14	65.86	n. a	100.00	1.93
	2	34.24	65.76	n. a	100.00	1.92
Py III	1	34.20	65.80	n. a	100.00	1.92
	2	34.41	65.40	0.19	100.00	1.90
Py IV	1	34.67	65.33	n. a	100.00	1.88
	2	33.23	66.77	n. a	100.00	2.01
	3	33.23	66.77	n. a	100.00	2.01
	4	34.68	65.32	n. a	100.00	1.88

1) n. a 表示“未检测出”，原子百分含量低于 0.1%

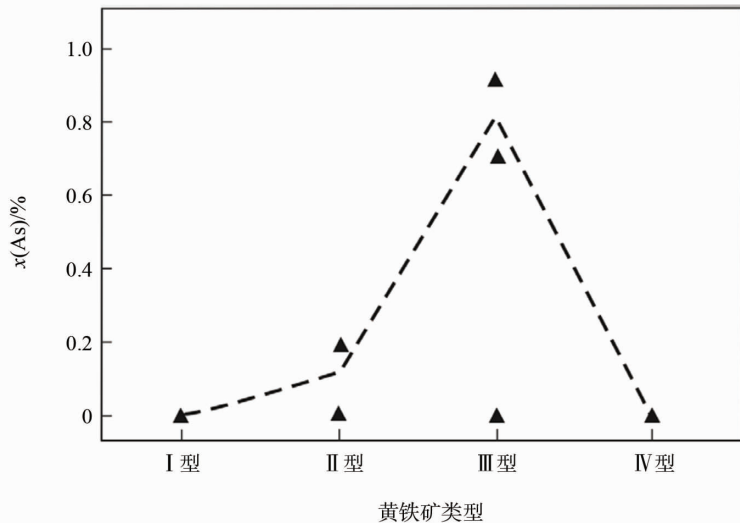


图 7 四种不同类型黄铁矿中 As 的原子百分比变化图

Fig. 7 Diagram of As contents in four different types of pyrites

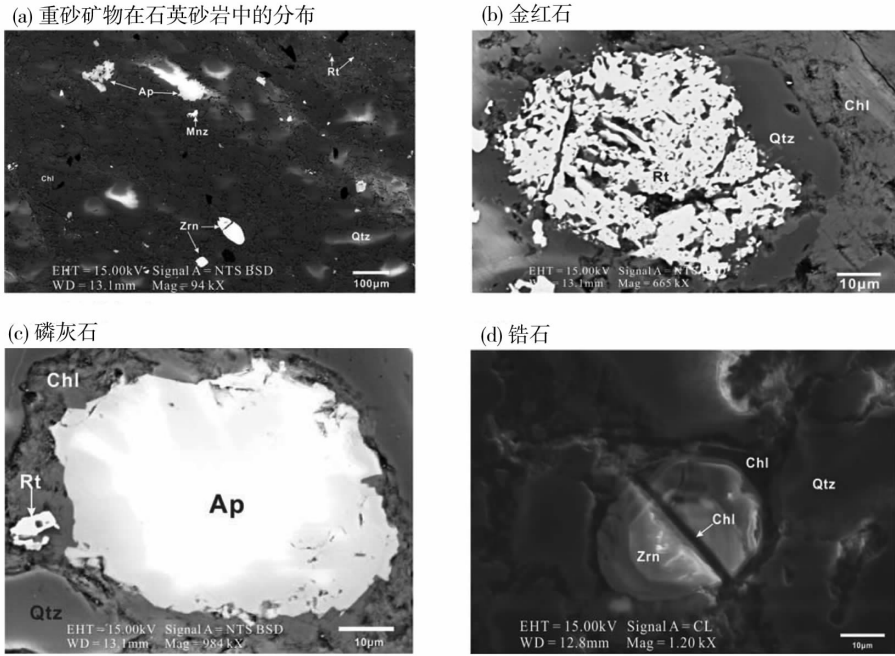


图 8 扫描电镜下的重砂矿物

Fig. 8 Heavy sand minerals under the SEM

Qtz 为石英; Chl 为绿泥石; Rt 为金红石; Ap 为磷灰石; Zrn 为锆石; Mnz 为独居石

4 讨论

4.1 成矿阶段与矿物生成序列

4.1.1 黄铁矿与毒砂 根据黄铁矿和毒砂与其他矿物的结构关系可划分出 3 个成矿阶段: ① I 型黄铁矿和 I 型毒砂局限于变质砂岩中, 被绿泥石和绢云母包围。因此可以认为 I 型黄铁矿和 I 型毒砂在砂岩绿泥石化和绢云母化过程中形成; ② II 型和 III 型黄铁矿、II 型毒砂、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、硫锑铜银矿产于后期石英网脉中, 结构关系复杂, 既有共生, 又有交代。其中 II 型黄铁矿多与方铅矿、闪锌矿共存, 而 III 型黄铁矿多与 II 型毒砂共生。II 型和 III 型黄铁矿虽然结构关系不同, 但仍可认为同处于多金属硫化物大量集中出现的阶段; ③ IV 型黄铁矿和 III 型毒砂以富含银金矿为特点, 应形成于银金矿矿化的阶段。

黄铁矿作为划分成矿阶段的标型特征, 其中 As 含量的变化明显具有 3 阶段 (低-高-低) 的特征 (图 7): I 型黄铁矿不含 As, 表明形成环境中 As 含量较低; II 型和 III 型黄铁矿均为含砷黄铁矿, 说明此时 As 元素大量进入黄铁矿晶格; IV 型黄铁矿也相对贫 As, 但部分却含有较高的 As 含量, 这可能是由于含 As 热液对黄铁矿的交代使部分 IV 型黄铁矿转变为含砷黄铁矿。

4.1.2 其他多金属硫矿物 其他金属硫矿物包括方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、硫锑铜银矿等。上述讨论已经表明它们是同时形成的。例如方铅矿、闪锌矿、黄铜矿和硫锑铜银矿的共结边结构, 闪锌矿和黄铜矿的定向乳浊状结构。但是, 由于辉钼矿仅仅单独出现在变质围岩中, 辉钼矿的形成阶段应比其他多金属硫化物形成更早。

4.1.3 Au 的矿化 X 射线能谱仪分析结果表明 Au 元素以银金矿, 而非自然金或不可见金的形式产出。在含金成矿流体中, 金沉淀与体系中 Fe^{3+} 等亲硫阳离子的活度增加有关^[32]。因此, 当含 Au 成矿热液中有黄铁矿 (FeS_2) 和毒砂 (FeAsS) 析出时, Au 更易伴随成矿。文献 [33] 认为, Au 元素能够沉淀附着在黄铁矿等硫化物的表面析出, 且优先富集在他形细粒、比表面积大的黄铁矿表面。黄泥坑金矿中的 IV 型黄铁矿即以他形细粒为主要形态特征, 其载金行为与上述实验结果相符。因此, IV 型黄铁矿与银金矿具有密切的成因联系。

4.1.4 碳酸盐矿物 随着热液与围岩的不断作用和矿质沉淀的结束, 残余的大量二氧化碳流体将以碳酸盐的形式结晶出来, 形成方解石和白云石等。因此在矿化晚期阶段出现以方解石为代表的碳酸盐矿物, 表现为石英-碳酸盐脉穿插石英脉体。碳酸盐矿物沉淀时矿化阶段已经结束或接近尾声, 可以

作为矿化结束的标志。

4.1.5 成矿阶段 根据以上各种矿物组合及矿化特征，黄泥坑金矿可划分出 4 个成矿阶段：

1) 绿泥石 - 绢云母化阶段：这一阶段为早期矿化阶段，以绿泥石、绢云母、I 型黄铁矿和 I 型毒砂为代表。石英砂岩发生了绿泥石化和绢云母化。伴随着围岩蚀变产生了少量矿化热液，形成了 I 型黄铁矿和 I 型毒砂，甚至辉钼矿。

2) 黄铁矿 - 毒砂 - 多金属硫化物阶段：受挤压环境影响，该阶段白色石英网脉穿切围岩，大量矿化流体涌入。这些矿化流体富含 Cu - Pb - Zn - Au - Ag 等金属元素，含 As 量升高，最终形成了多种含 As 金属硫化物，如 II 型和 III 型黄铁矿、II 型

毒砂、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿和硫锑铜银矿等。

3) 黄铁矿 - 毒砂 - 银金矿阶段：这一阶段为 Au - Ag 的主要矿化阶段。银金矿附着在 IV 型黄铁矿和 III 型毒砂表面沉淀出来，并伴随着少量方铅矿的出现。

4) 碳酸盐化阶段：这一阶段主要形成方解石、白云石等碳酸盐矿物，为成矿的最后阶段，已无可观的金属矿物形成。此时应力环境已转变为拉张。

4.1.6 矿物生成序列 在黄泥坑金矿系统中，Fe - Mo - Zn - Cu - Pb - Ag - Au 等金属元素依次矿化并形成相应矿物。据此可得黄泥坑金矿的矿物生成序列表（图 9）。

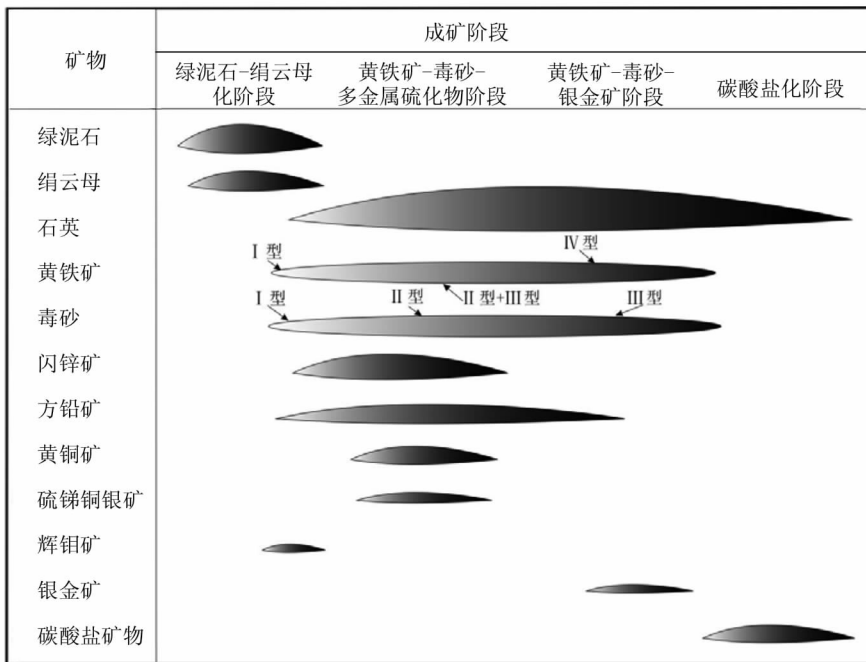


图 9 黄泥坑金矿矿物生成序列表

Fig. 9 Mineral sequences of the Huangnikeng deposit

4.2 矿床类型

黄泥坑金矿产于钦杭成矿带内，这一成矿带向来被视为华夏与扬子两大古板块的碰撞拼合造山带，且黄泥坑金矿矿体受广宁 - 罗定这一韧性剪切带控制。广宁 - 罗定断裂形成于印支期，这一时间与钦杭成矿带印支期造山事件吻合。距离黄泥坑金矿很近的另一被韧性剪切带控制的造山型金矿——河台金矿同样被限定在印支 - 燕山期形成。这些事实说明黄泥坑金矿很可能形成于印支 - 燕山期造山环境中。造山作用形成的变质流体携带多种矿

质和 Au 的络合物，其中的 Au 和 Ag 元素可能来自于八村群变质地层。这些流体沿着广宁 - 罗定韧性剪切带运移、混合以及沉淀成矿。韧性剪切带首先为流体提供了通道和空间，有利于不同流体的运移和混合；其次，断裂处物化条件的改变有利于矿质的沉淀，从而控制矿体分布。经过不同阶段成矿作用，成矿流体最终以石英脉体形式充填在区域浅变质岩系中，形成了黄泥坑的银金矿藏。但后期碳酸盐化阶段很可能发生于燕山早期的拉张环境，即中生代转换体制，这从碳酸盐矿物粗大的晶体可以看出。

因此,黄泥坑金矿的形成与造山作用有关,成矿发生于印支-燕山期挤压向伸展转换体制;矿体受韧性剪切带控制;矿体填充绿片岩相变质围岩,表明形成晚于区域变质事件;蚀变矿物组合以石英-绢云母-绿泥石-多金属硫化物-碳酸盐矿物为特征。这些特点都符合目前公认的造山型金矿的典型特征。

文献 [32] 对华北大量造山型金矿进行了研究,按照黄铁矿的标型特征将造山型金矿划分为早-中-晚 3 个阶段:石英-黄铁矿阶段(对应黄泥坑金矿的绿泥石-绢云母阶段),金属硫化物阶段(对应黄泥坑金矿的黄铁矿-毒砂-多金属硫化物阶段和黄铁矿-毒砂-银金矿阶段),石英-碳酸盐阶段(对应黄泥坑金矿的碳酸盐化阶段)。该研究将金元素的矿化归为金属硫化物阶段,与所谓“烟灰状”黄铁矿,即细粒、粉末状黄铁矿,密切相关。黄泥坑金矿的成矿阶段、黄铁矿类型与该研究成果相符。

综合以上讨论,黄泥坑金矿很可能是一个造山型金矿。但是应该指出,造山型金矿的流体包裹体最具鉴定特征,其往往显示出低盐度、富含 CO₂ 的特点^[17-19]。黄泥坑金矿是否确定为造山型金矿,仍需其流体包裹体对成矿流体的约束^[34-36]。同时,由于黄泥坑金矿基础研究几近空白,金矿的具体形成时间、地球化学特征等需要进一步确定,并与区域地质和构造事件对比以还原形成演化历史。因此,黄泥坑金矿的矿床类型值得进一步深入研究。

5 结 论

1) 黄泥坑金矿发育了 3 期黄铁矿和 3 期毒砂,包括 4 种类型的黄铁矿和 3 种类型的毒砂,其中银金矿化主要与 IV 型黄铁矿和 III 型毒砂有关;

2) 黄泥坑金矿可分为绿泥石-绢云母化阶段、黄铁矿-毒砂-多金属硫化物阶段、黄铁矿-毒砂-银金矿阶段和碳酸盐化阶段;

3) 黄泥坑金矿成因类型为造山型金矿,形成于印支-燕山期造山过程。

参考文献:

[1] 毛景文,陈懋弘,袁顺达,等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 636-657.
MAO J W, CHEN M H, YUAN S D, et al. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic

belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 636-657.

- [2] 徐德明,蒯志勇,骆学全,等. 钦-杭成矿带主要金属矿床成矿系列[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 7-24.
XU D M, LIN Z Y, LUO X Q, et al. Metallogenetic series of major metallic deposits in the Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(2): 7-24.
- [3] 周永章,郑义,曾长育,等. 关于钦-杭成矿带的若干认识[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 1-6.
ZHOU Y Z, ZHENG Y, ZENG C Y, et al. On the understanding of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt, South China[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(2): 1-6.
- [4] 梁新权,李献华,邱元禧,等. 华南印支期碰撞造山-十万大山盆地构造和沉积学证据[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(1): 99-112.
LIANG X Q, LI X H, QIU Y X, et al. Indosinian collisional orogeny: Evidence from structural and sedimentary geology in Shiwandashan Basin, South China[J]. 2005, 29(1): 99-112.
- [5] CHARVET J, SHU L S, SHI Y S, et al. The building of south China: collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1996, 13(3/4/5): 223-235.
- [6] WANG Y J, FAN W M, ZHANG G W, et al. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies [J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1273-1305.
- [7] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.
SHU L S. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [8] 翟伟,李兆麟,孙晓明,等. 粤西河台金矿锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. 地质论评, 2006, 52(5): 690-699.
ZHAI W, LI Z L, SUN X M, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Hetai gold deposit in Western Guangdong, China and geological implications[J]. Acta Mineralogical Sinica, 2006, 52(5): 690-699.
- [9] ZHENG Y, ZHOU Y Z, WANG Y J, et al. A fluid inclusion study of the Hetai goldfield in the Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt, South China [J]. Ore

Geology Reviews, 2016, 73: 346–353.

- [10] LIANG H F, XIA P, WANG X Z, et al. Geology and geochemistry of the adjacent Changkeng gold and Fuwang silver deposits, Guangdong Province, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31(1/2/3/4): 304–318.
- [11] 王祖伟, 周永章. 粤桂边境庞西垌-金山银金矿床特征与成因[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(2): 193–197.
WANG Z W, ZHOU Y Z. Geological characteristics and genesis of the Pangxidong-Jinshan Au-Ag deposit in Yunkai terrain, South China[J]. *Geotectonic et Metallogenia*, 2002, 26(2): 193–197.
- [12] ZHAO C, NI P, WANG G G, et al. Geology, fluid inclusion, and isotope constraints on ore genesis of the Neoproterozoic Jinshan orogenic gold deposit, South China [J]. *Geofluids*, 2013, 13: 506–527.
- [13] GROVES D, GOLDFARB R, 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] KERRECH R, GOLDFARB R, GROVES D, et al. The characteristics, origins and geodynamics settings of supergiant gold metallogenic provinces [J]. *Science in China: Series D*, 2000, 43 (supp): 1–68.
- [15] CHEN Y J. Orogenic type deposits and their metallogenic model and exploration Potential [J]. *Geology in China*, 2006, 33: 1181–1196.
- [16] 范宏瑞, 谢奕汉, 翟民国, 等. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用[J]. *岩石学报*, 2003, 19(2): 260–266.
FAN H R, XIE Y H, ZHAI M G, et al. A three stage fluid flow model for Xiaoqinling lode gold metallogenesis in the He'nan and Shaanxi provinces, central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(2): 260–266.
- [17] 陈衍景. 初论浅成作用和热液矿床成因分类[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 27–34.
CHEN Y J. On epizonogenism and genetic classification of hydrothermal deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 27–34.
- [18] PHILLIPS N, POWELL R. Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model [J]. *Metamorphic Geology*, 2010, 28(6): 689–718.
- [19] ZHAN L, ZHENG Y, CHEN Y J. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb-Zn-Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: A case study of orogenic type Pb-Zn systems [J]. *Asian Earth Science*, 2012, 49: 69–79.
- [20] GOLDFARB J, GROVES I, CARDOLL S. Orogenic Au and geologic time: a global synthesis [J]. *Ore Geology Review*, 2001, 18: 1–75.
- [21] GROVES I, GOLDFARB J, ROBERT F, et al. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance [J]. *Economical Geology*, 2003, 98: 1–29.
- [22] LI J W, BI S J. Giant Mesozoic gold provinces related to the destruction of the North China Craton [J]. *EPSL*, 2012, 349/350: 26–37.
- [23] 孙晓明, 石贵勇, 熊德信, 等. 云南哀牢山金矿带大坪金矿铂族元素(PGE)和 Re-Os 同位素地球化学及其矿床成因意义[J]. *地质学报*, 2007, 81(3): 394–404.
SUN X M, SHI G Y, XIONG D X, et al. Platinum group elements geochemistry and Re-Os isotopic compositions of Daping gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, China and their metallogenic implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(3): 394–404.
- [24] 熊德信, 孙晓明, 翟伟, 等. 云南大坪韧性剪切带型金矿富 CO₂ 流体包裹体及其成矿意义[J]. *地质学报*, 2007, 81(4): 640–653.
XIONG D X, SUN X M, ZHAI W, et al. CO₂-rich fluid inclusions in auriferous Quartz veins from the Daping ductile shear zone hosted gold deposit in Yunnan Province, China, and its implications for gold mineralization [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4): 640–653.
- [25] 杨立强, 邓军, 赵凯, 等. 滇西大坪金矿床地质特征及成因初探[J]. *岩石学报*, 2011, 27(12): 3800–3810.
YANG L Q, DENG J, ZHAO K, et al. Geological characteristics and genetic type of Daping gold deposit in the Ailaoshan orogenic belt, SW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(12): 3800–3810.
- [26] 徐燕君, 罗义付, 肖光铭, 等. 粤西黄泥坑金矿床地质特征及成因浅析[J]. *华南地质与矿产*, 2012, 28(4): 369–375.
XU Y J, LUO Y F, XIAO G M, et al. Geological characteristics and ore genesis of Huangnikeng gold deposit in Western Guangdong Province, South China [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2012, 28

- (4): 369 – 375.
- [27] WANG Y J, FAN W M, ZHAO G C H, et al. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block [J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 404 – 416.
- [28] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(14): 1873 – 1885.
LI X H, LI X W, LI Z X. On the genetic classification and tectonic implication of the early Yanshanian granitoids in the Nanling range, South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(14): 1873 – 1885.
- [29] ZHANG K J, CAI J X. NE-SW-trending Hepu-Hetai dextral shear zone in southern China; Penetration of the Yunkai Promontory of South China into Indochina [J]. *Journal of Structural Geology*, 2009, 31: 727 – 748.
- [30] CAI J X. An early Jurassic dextral strike-slip system in southern South China and its tectonic significance [J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, 63: 27 – 44.
- [31] 夏斌, 林清茶, 张玉泉. 广东罗定龙塘碱性花岗岩锆石 SHRIMP 定年及地质意义[J]. *地质科学*, 2006, 41(3): 511 – 517.
XIA B, LIN G C, ZHANG Y Q. Zircon SHRIMP dating of the Longtang alkaline granite at Luoding, Guangdong, and its geological implications[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41(3): 511 – 517.
- [32] 李晶, 陈衍景, 刘迎新. 华北克拉通若干脉状金矿的黄铁矿标型特征与流体成矿过程[J]. *矿物岩石*, 2004, 3(24): 93 – 102.
LI J, CHEN Y J, LIU Y X. Typomorphic characteristics of pyrite from the lode gold deposits in North China craton; Implications for fluid mineralization[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2004, 3(24): 93 – 102.
- [33] 赵伦山, 陈岳龙, 叶荣. 含金黄铁矿的模拟合成实验及热液作用中金富集机制[J]. *地学前缘*, 1998, 5(1/2): 301 – 310.
ZHAO L S, CHEN Y L, YE R. Synthetic experiments of gold-bearing pyrite and the ore-formation of gold in hydrothermal process [J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(1/2): 301 – 310.
- [34] 邱正杰, 范宏瑞, 丛培章, 等. 造山型金矿床成矿过程研究进展[J]. *矿床地质*, 2015, 34(1): 21 – 28.
QIU Z J, FAN H R, CONG P Z, et al. Recent progress in the study of ore-forming processes of orogenic gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(1): 21 – 28.
- [35] 孙晓明, 韦慧晓, 翟伟, 等. 藏南邦不大型造山型金矿成矿流体地球化学和成矿机制[J]. *岩石学报*, 2010, 26(6): 1672 – 1684.
SUN X M, WEI X H, ZHAI W, et al. Ore-forming fluid geochemistry and metallogenic mechanism of Bangbu large-scale orogenic gold deposit in southern Tibet, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(6): 1672 – 1684.
- [36] 杨利亚, 杨立强, 袁万明, 等. 造山型金矿成矿流体来源与演化的氢 – 氧同位素示踪: 夹皮沟金矿带例析[J]. *岩石学报*, 2013, 29(11): 4015 – 4035.
YANG L Y, YANG L Q, YUAN W M, et al. Origin and evolution of ore fluid for orogenic gold traced by D-O isotopes: A case from the Jiapigou gold belt, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(6): 1672 – 1684.