

福建政和东际金(银)矿床矿浆隐爆角砾岩成矿模型及其动力学研究

朱玉磷, 毛光武, 严卸平

中国冶金地质总局二局, 福州, 350007

内容提要: 本文描述政和东际金(银)矿床地质特征, 建立矿床成矿模型, 论证矿床物质运移动力学过程, 探讨成矿物质来源。矿山经过系统的勘探和开采, 将暴露于地表 580~620 m 的矿体直至延深到地下-200 m, 均得到钻探和探硐的完整揭露。采用常规、可靠的地质论证法全面收集了第一手资料以及宏微观的岩矿鉴定及部分电子探针分析, 对研究标的进行综合论述。政和东际金(银)矿床矿化角砾岩筒自上而下可分为 5 个相带: 震裂相、震碎相、隐爆相、上部通道相及下部通道相。从矿石结构构造特征、矿体侵入围岩接触关系、角砾特征、胶结物成分等一系列现象判断, 矿床为矿浆隐爆成因。源于壳幔过渡带深部中酸性岩浆熔离分异的富硅、富铁熔浆, 富硅熔浆先一步上侵形成大规模的火山喷发及潜火山岩的侵入, 富铁熔浆滞留于“源地”, 俘获硫化物液滴, 储集成混合矿浆。物理性状及运移动力学特征表明, 在外驱动力作用下, 矿浆沿着石英斑岩“岩浆热场通道”上侵, 在古地表之下 2.0~2.5 km 处, 石英斑岩硅帽隔挡层下聚集、隐爆、定位成矿。石英斑岩为容矿围岩, 与矿床有密切的时空关系但与成因无关。深部钻探验证表明隐爆角砾岩筒尾部在石英斑岩中收敛, 矿化随之结束。“矿浆隐爆”作为“隐爆角砾岩型金矿”大家族中新成员, 目前尚未见报道。该新类型的发现, 为中酸性岩浆熔离分异成矿理论提供了难得的实例, 也将有助于中国东南沿海中生代陆相火山岩区同类型金矿的找矿工作。

关键词: 东际金矿; 矿浆; 隐爆; 角砾岩筒; 动力学过程

“矿浆”一词, 其原意是指结晶出矿石的岩浆 (Ore magma), 或岩浆的金属相, 在成因上以其熔融体与充填裂隙的溶液相区别 (Spurr, 1923)。矿浆成矿问题争论了近一个世纪, 在解释基性—超基性岩浆熔离、结晶分异成矿方面取得了成功。20 世纪 80 年代国内一批学者 (汤中立等, 1987; 汤中立, 1990; 傅德彬, 1983, 1994; 方华等, 1985; 骆华宝, 1990) 研究基性—超基性硫化铜镍矿床矿浆成矿, 提出深部熔离—贯入式成因, 将矿浆成矿理论提升到一个几乎完美的高度, 得到广大地学工作者的认同。矿浆成矿说能否进一步拓展引用到中性岩浆、甚至酸性岩浆成矿尚存争议, 在宁芜一带与玢岩有关的“宁芜型铁矿”, 有矿浆成矿说 (宋学信等, 1981; 袁家铮等, 1997)、热液—蚀变—交代成因说 (张荣华, 1979; 卢冰等, 1990), 总体上并没有像硫化铜镍矿床矿浆成因说那么受到广泛的认同。

世事常常是一种倾向掩盖另一种倾向, 基性—超基性岩浆成矿从传统经典的结晶重力分异到深部

熔离矿浆—贯入成矿堪称成功典范, 中性岩浆有关的铁矿矿浆成因争论已偃旗息鼓, 矿浆说自从被热液成矿说掩盖之后, 矿浆说就难有研究者问津。近年来岩浆熔离分异被重新重视, 在基性、中基性岩浆熔离的野外地质实例和实验研究已经证实其存在 (侯增谦, 1987, 1990a, 1990b; 谭劲等, 1997, 1998), 并形成矿床 (侯增谦, 1990a; 王坤等, 2017), 再有富锂氟花岗岩岩浆下部结晶分异、上部液态分异的“浆液分离”成矿效应 (王联魁等, 1983; 李建康等, 2008), 至于与中—酸性岩浆有关的岩浆熔离演化及其矿浆成矿, 未见研究报道。

唐菊兴 (1995)、罗镇宽等 (1999) 对国内外角砾岩型金矿成矿模型进行对比总结并划分不同类型; 卿敏等 (2002)、宋保昌等 (2002)、张会琼等 (2012) 进一步论述了隐爆角砾岩型金矿成因及角砾岩筒分带; 毛光武等 (2016) 对隐爆角砾岩型金矿床的系统综述, 总结了各种类型成因的隐爆角砾岩型金矿。纵观以上成果均未见提及矿浆引起的隐爆成因矿

床。

福建省政和东际金(银)矿产于中国东南沿海中生代陆相中—酸性火山岩区,是近年来新探明的中型矿床,已有不少著者发文论述:矿床成因初析(刘永发,2011)认为属于潜火山热液矿床;成矿物质源及成矿时代研究(肖凡等,2015,2020)得出物源具有壳幔深源特点及成矿时间限制在 96.8 Ma 之前;流体成分研究(王波涛等,2019)认为矿床属浅成—低温范畴;总结区域性成矿特征及找矿规律(刘曰富等,2019)提高了本区科普水平;从先进仪器读取的大数据处理(卢燕等,2017)自圆其说了蚀变特征与勘探指示的相关性。

本文第一作者主持政和东际金(银)矿勘查—开发 12 年,积累了丰富的野外宏观地质资料,证据显示出矿床属于矿浆—隐爆成因特征,前人研究并未涉及。本文拟对矿浆引起的隐爆成矿特征及矿浆来源、运移动力学过程进行论述,以期丰富中酸性岩浆熔离分异成矿理论,所建立的成矿模型对东南沿海中生代陆相中—酸性火山岩区寻找同类矿床具有重要指导意义。

1 区域地质背景

1.1 火山构造活动带

矿区处于浙、闽、粤火山活动带—闽东火山活动亚带(Ⅱ₂),松溪—宁德北西向喷发带(Ⅲ₇),与浙江相邻的政和东坑火山洼地(Ⅳ)之西部周边(福建地质调查研究院,2016)(图 1a、b)。东坑火山洼地处政和一大埔断裂带北东段与松溪—宁德北西向断裂带交汇处,两断裂带长期活动影响着火山—岩浆建造组合的发育,火山喷发晚期塌陷形成的环状、放射状断裂制约潜火山岩岩浆侵入,潜火山岩岩浆侵入空间往往又成为成矿作用的有利场所。火山作用期后整体地应力释放,火山洼地中发育的一系列围斜内倾的阶梯状断裂活动,造成地层、潜火山侵入体及产于其中的矿体受到破坏,展示现今一幅复杂的地质图像(图 1a、b、c)。

1.2 地层

据 1:50000 政和、川石、后山幅区调划分方案^①,对比福建省岩石地层厘定结果(福建省地质矿产局,1997),区域上出露岩性以中生代晚侏罗世—早白垩世中酸性火山岩为主(图 1b、c),其岩性为:

下白垩统寨下组上段(Kz²):以紫灰色厚层状流纹质熔结角砾岩、熔结凝灰岩、流纹质火山角砾岩为主,夹英安岩、凝灰岩,局部见砂砾岩,喷发不整合

覆于本组下段之上,厚达 3048 m。永泰寨下组层型剖面钾长流纹岩 K-Ar 同位素年龄值 106.8 Ma(福建省地质矿产局,1997)。

下白垩统寨下组下段(Kz¹):不整合覆于黄坑组之上的一段火山喷发间歇期山间火山沉积岩。岩性为紫灰、紫色凝灰质砂砾岩夹凝灰质粉砂岩、沉火山角砾岩,局部夹英安岩,厚度 109 m。

下白垩统黄坑组上段(Kh²):喷发不整合覆于黄坑组下段之上。下部以灰紫色厚层状流纹质熔结角砾凝灰岩、熔结凝灰岩为主,夹火山角砾岩、英安岩;上部以灰黑色厚层状英安岩为主夹凝灰岩、砾砂岩、粉砂岩等,厚度大于 1035 m。永泰寨下组层型剖面玄武岩 K-Ar 同位素年龄值 113.2 Ma(福建省地质矿产局,1997)。

下白垩统黄坑组下段(Kh¹):不整合覆于小溪组地层之上。岩性为紫红色中厚层状凝灰质砂砾岩、含砾砂岩、薄层状粉砂岩、泥岩,夹火山角砾岩、英安岩、晶屑凝灰岩,厚 992 m。

上侏罗统小溪组(JKx):主要为浅灰白色流纹质晶屑(凝灰)熔岩、英安质晶屑凝灰岩,下部夹晶屑凝灰岩,上部夹粉砂岩,厚度大于 623 m,喷发不整合于震旦系稻香组地层之上。

震旦系稻香组(Zdx):分布在东际自然村一带,厚度大于 122 m,为一套浅变质岩系,下部为绿帘石化安山质沉凝灰岩夹凝灰质粉砂岩及硅质岩,上部为硅质片岩、泥质凝灰质片岩,部分地段夹千枚岩。

1.3 潜火山岩

区域上出露众多潜火山岩脉,这里仅列述与金(银)矿产出密切相关的石英斑岩、正长斑岩。

石英斑岩(Qπ),呈似层状(席状)侵入于东坑火山洼地西部周边小溪组(JKx)底部和基底稻香组(Zdx)交界附近的火山环状断裂薄弱带之中,其侵入最晚地层为黄坑组(图 5e)。斑岩体长 600 余米,最宽近百米,岩石浅灰白色,斑状结构,内接触带常见流纹状构造,基质隐晶质结构或霏细结构;斑晶大小 0.1~1.0 mm,主要为石英,次有长石,含量 1%~15%,基质由隐晶状长英质组成(图 4i、j、k、l)。值得指出的是,由于石英斑岩仅在岩体边缘局部发育流纹构造,若命名为流纹斑岩不尽合适故修正为石英斑岩,本文所指石英斑岩与原矿区储量报告^②及刘永发(2011)所指的流纹斑岩为同一岩体。需要强调的是,在中生代陆相火山岩区要将火山喷出岩和产于其中的潜火山岩(斑岩)区别开来,这是有关找矿布局和矿床成因的原则问题,务必研究清楚

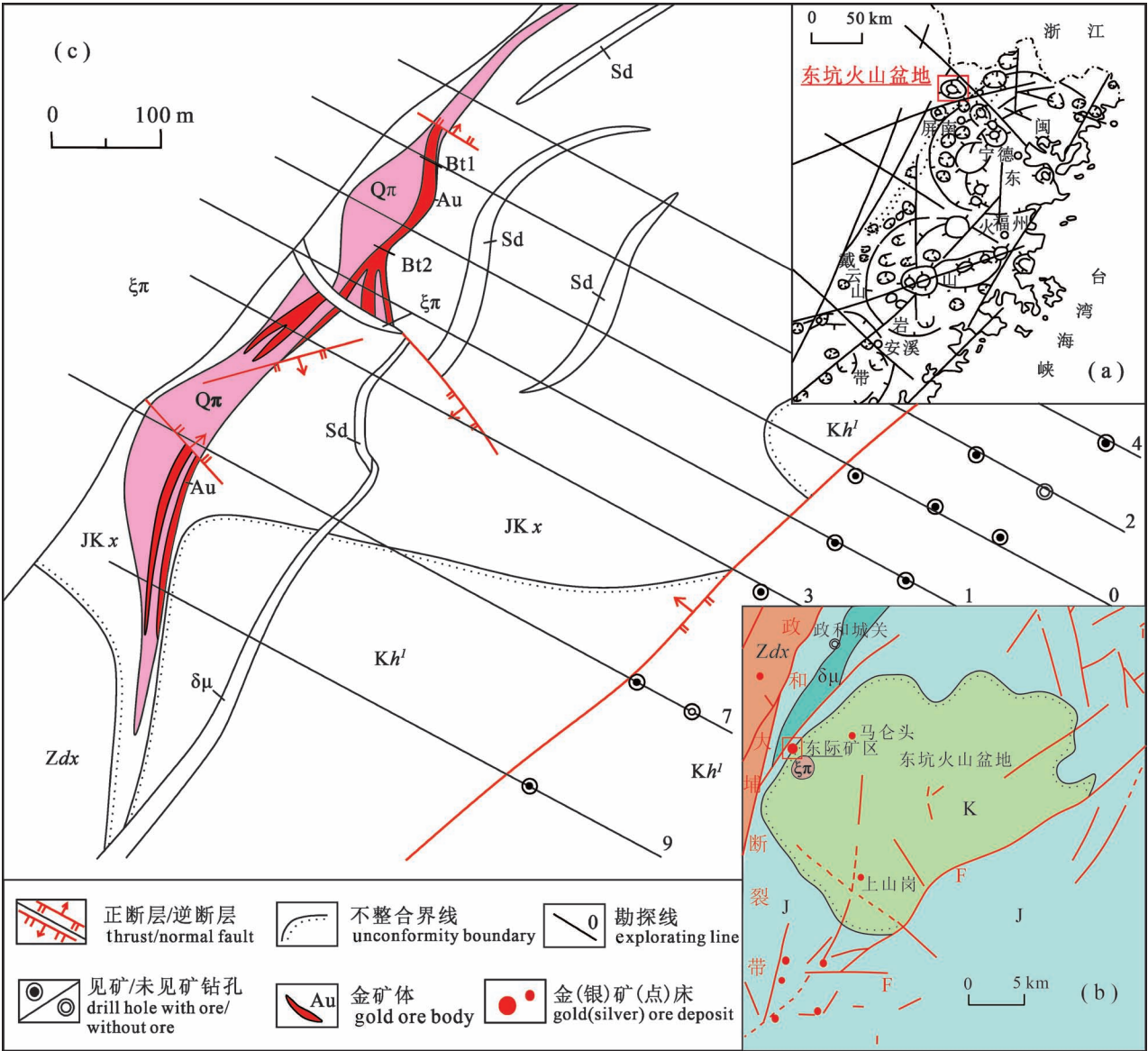


图 1 政和东际金(银)矿区地质图:(a)福建省火山构造图;(b)东坑火山洼地构造图;
(c)东际金(银)矿区地质图

Fig. 1 Geological map of the Dongjigold (silver)deposit, Zhenghe County: (a) volcanic—tectonic map of Fujian Province; (b) volcanic—tectonic depression map of Dongkeng; (c) geological map of the Dongji gold (silver) area

Kh¹—黄坑组;K—白垩纪火山岩;JKx—小溪组;J—侏罗纪火山岩;Zdx—震旦系稻香组;
Qπ—石英斑岩;δμ—闪长玢岩;ξπ—正长斑岩;Sd—硅化蚀变岩

Kh¹—Huangkeng Formation; K—Cretaceous volcanic rocks; JKx —Xiaoxi Formation; J—Jurassic volcanic rocks; Zdx Daoxiang Group of Sinian (Ediacaran) System; Qπ—quartz porphyry; δμ—diorite porphyry; ξπ—syenite porphyry; Sd—Silico altered rock

(朱玉磷等,2009)。本区地表、钻探、探硐工程、镜下微观现象所揭示的斑岩(充填矿化)与火山喷出岩接触关系(图 2b,图 4k,图 5f,j)、岩石结构构造差异(图 4g—l),以及野外根据接触关系确认斑岩体的产状,石英斑岩与火山喷出岩可以明显区分。
切割金(银)矿体的正长斑岩(ξπ),浅肉红色,

斑状结构,斑晶大小 2~4 mm,由钾长石 15%~20%,石英 20%~25%组成,基质显微花岗结构。石英正长斑岩中常见深源基性岩包体,大小 5~20 cm,呈椭球状、不规则麻花状。正长斑岩单锆石 U-Pb 同位素年龄 96.8 Ma(肖凡等,2020)。

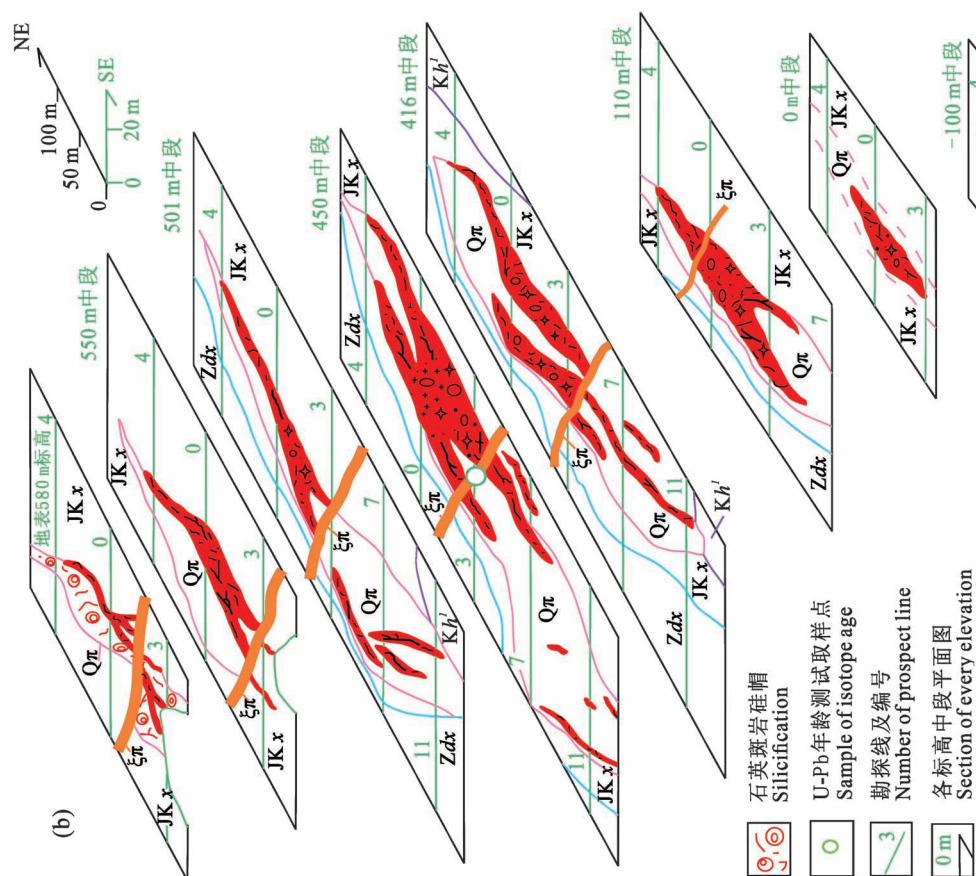


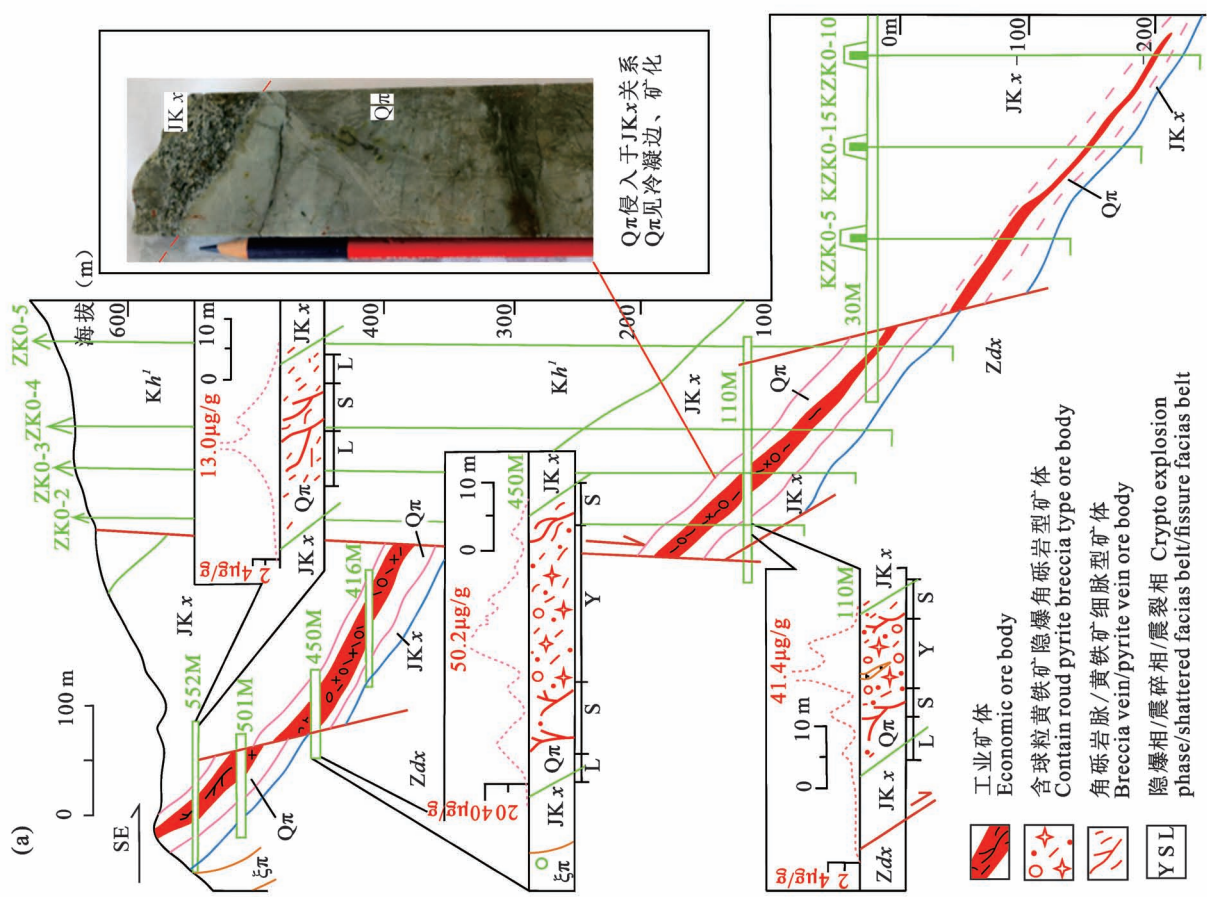
图2 政和东际金（银）矿区矿体地质图:

(a) 0 线剖面图; (b) 各中段综合立体图

Fig. 2 The Geological map of gold (silver) orebodies in Dongji,

Zhenghe County: (a) No. 0 cross section map; (b) the

stereogram in space show of gold (silver) orebodies



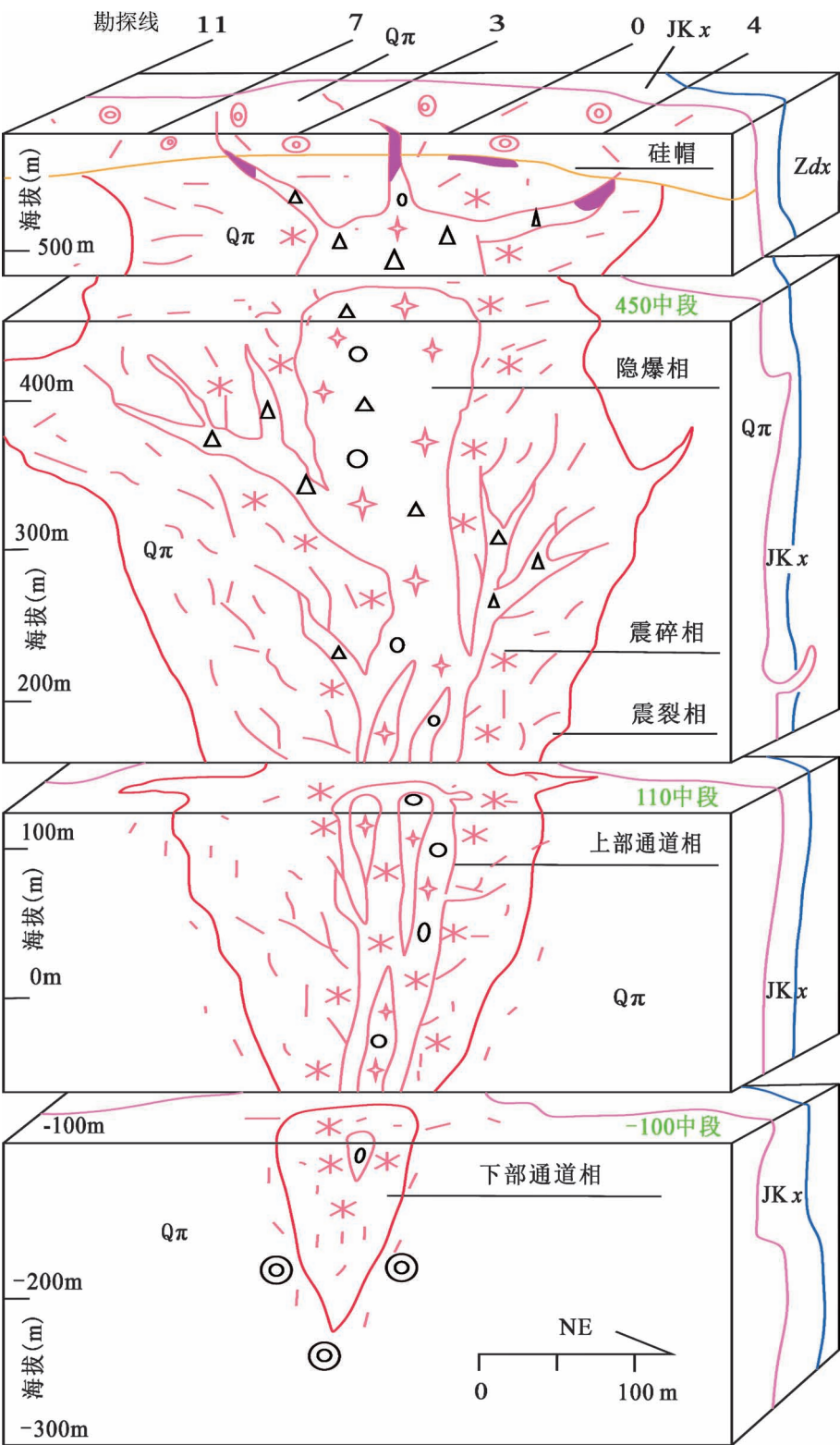


图 3 政和东际矿床角砾岩筒分带倾向剖面纵投影图
Fig. 3 Zonality style of crypto-explosive breccia pipe of tendency section of projection map in Dongji deposit, Zhenghe County

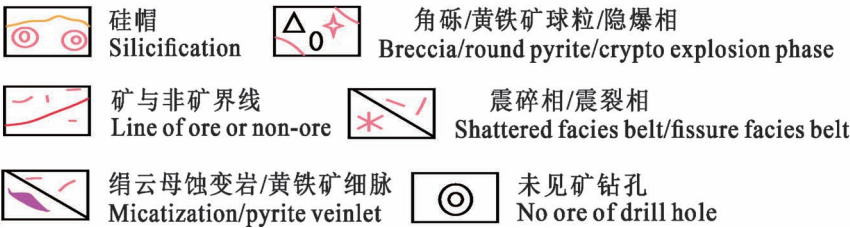
2 矿床地质特征

2.1 矿体

政和东际矿区划分有 5 个金(银)矿体, I 号矿体占有资源储量 88%。I 号矿体和其分支的 II、III、IV 号矿体均无一例外赋存于石英斑岩体内^②, V 号矿体(占有资源储量不足 1%)从 I 号主矿体向外伸出、穿透石英斑岩体而贯入顶板火山岩之中。I 号主矿体走向上大致呈北东方向,地表出露长约 300 m(图 1c), 450 m 中段最长达 550 m, 向下逐渐收窄, 110 m 中段长 250 m, 至标高 -200 m 尖灭。矿体倾向南东, 倾角 30°~40°, 从地表海拔 620 m 往下已控制延伸至 -200 m, 扣除阶梯状正断层的断距影响, 倾向延伸 960 多米, 倾向延伸长度明显大于走向(图 2, 3)。已探明金金属量 12.0 t、银金属量 140.0 t, 矿床平均品位 Au 4.14 μg/g, Ag 45 μg/g^②(未含 0 m 标高以下未估算的资源储量)。

2.2 矿化类型

政和东际金(银)矿体几乎全部产于石英斑岩中, 斑岩变宽处, 矿体厚大、含金量也高。矿化可分成隐爆角砾岩体(厚度大于 2 m, 图 6a)、角砾岩脉(厚度小于 2 m, 图 6b、c)、密集网脉(脉幅 20~40



条/m,脉宽 0.5~2.0 mm,图 6d)和稀疏网脉(脉幅少于 20 条/m,图 6e)4 种矿化类型。

各矿化类型分布规律(图 2、3):横向上 416 m、450 m 中段,从中心隐爆角砾岩体型矿化的高品位矿石(平均 Au 10 μg/g),向外渐变为角砾岩脉型矿化的中等品位矿石(Au 3~6 μg/g),再过渡为密集

网脉型矿化的低品位矿石(Au 2~3 μg/g),直至稀疏网脉型矿化(Au 0.5~1.0 μg/g)。纵向上从地表 620 m 到 517 m 中段发育角砾岩脉、密集网脉矿化类型;501 m 中段出现隐爆角砾岩体,到 450 m 中段宽达 30 m,至 416 m 中段隐爆角砾岩体宽度收窄,再到 110 m 中段揭露的多个近圆筒状(直径 2~5 m

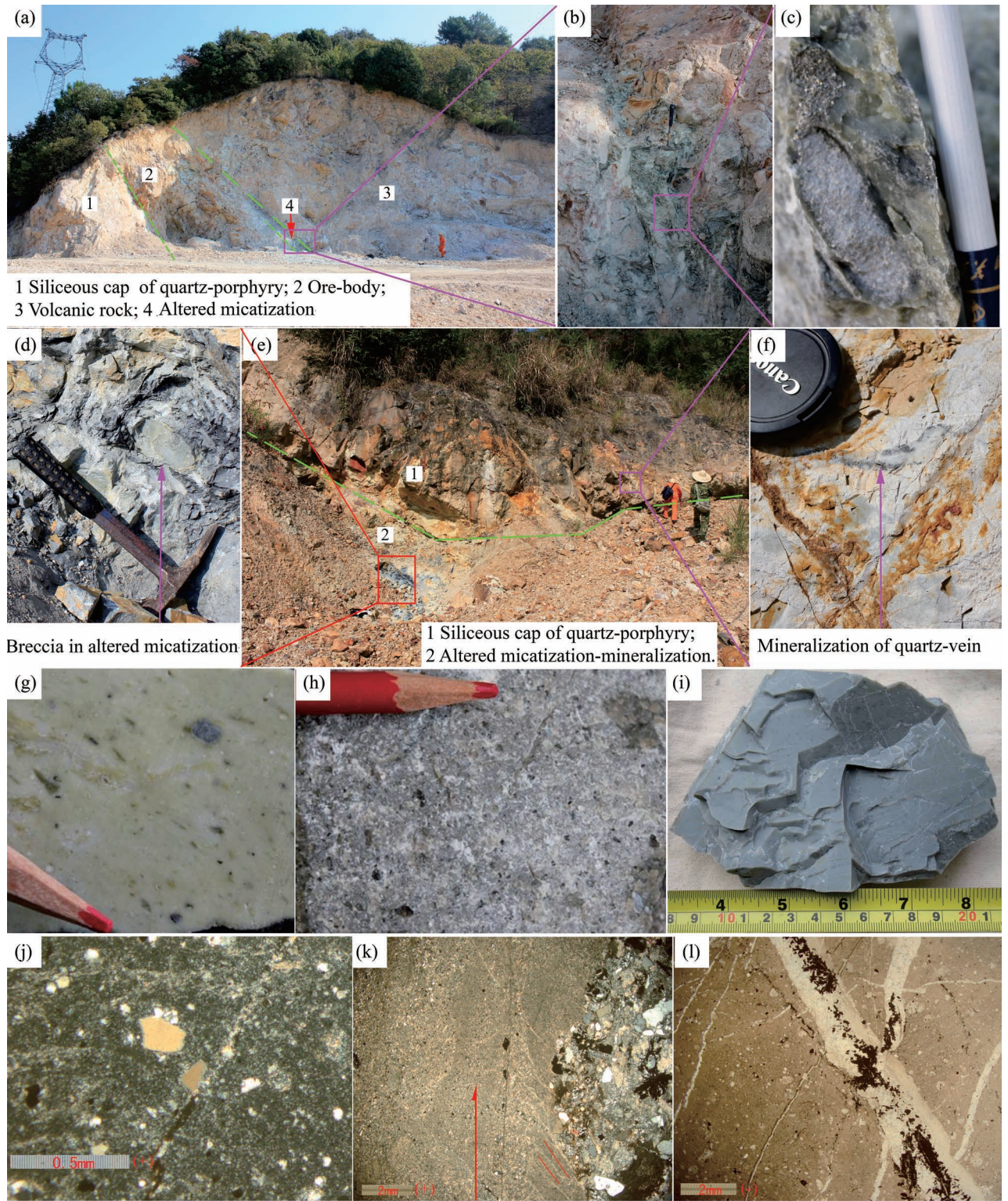


图 4 政和东际金(银)矿矿体头部蚀变特征及相关围岩岩性特征:(a)地表 620 mBt1 矿化蚀变露头;(b)绢云母蚀变岩;(c)流化角砾;(d)泥化岩中流化角砾;(e)580 mBt2 石英斑岩硅帽;(f)贯入于硅帽中的矿脉;(g)岩屑玻屑凝灰岩;(h)晶屑熔岩;(i)石英斑岩标本;(j)镜下(+)石英斑岩;(k)镜下(+)石英斑岩侵入于晶屑熔岩,流动构造箭头示斑岩向上侵入;(l)镜下(-)石英斑岩中早期石英线脉被后期含金黄铁矿石英细脉切割,矿化未引起斑岩蚀变

Fig. 4 Altered features of the heads of orebodies and surrounding rock in Dongji gold (silver) deposit, Zhenghe County: (a) ore outcrop in surface at 620mBt1; (b) micatization; (c) breccia in micatization; (d) breccia in altered micatization; (e) ore outcrop in surface at 580mBt2; (f) the ore vein in siliceous cap; (g) clastic—glassy tuff; (h) crystallinoclastic lava; (i) sample of quartz-porphyry; (j) microtexture of quartz-porphyry (+); (k) quartz-porphyry invaded crystallinoclastic lava of intrusive contact in microscope (+); (l) early quartz veinlets was cut by later period pyrite vein (containing gold), quartz porphyry was non-altered (-)

不等)的角砾岩体型矿化;直至-100 m 只有单个角砾岩体和稀疏网脉状矿化。深部矿体规模进一步缩小(图 2、3),并以稀疏网脉状矿化为主,至-200 m 标高处彻底尖灭,矿体厚度 1~3 m 居多、矿石一般品位 Au 1~3 μg/g。

2.3 矿石矿物特征

金属矿物以黄铁矿(95%以上)为主及少量毒砂、微量的黄铜矿组成,在纵向上并无明显变化。金属硫化物为主要的载金体,在 450 m 中段刻槽取样块状黄铁矿含 Au 113.37 μg/g,胶结角砾的灰黑色胶结物一般 Au 5~10 μg/g,角砾不含金。电子探针分析(表 1)金银矿物有金银矿、银矿、硫砷银矿,银矿物还有含铁金银矿、含锑铜砷银矿。金银矿物充填于黄铁矿、毒砂矿物粒间及裂隙中,有些呈蠕虫状“悬浮”于富铁熔浆的胶结物中(图 7a、b)。金银矿物颗粒 10~100 μm,金成色率 13~47, Au:Ag 约 1:2。硫砷银矿与标准结构式比较具有更高的砷含量,并有铁、铜对银的类质同象置换,造成银的含量相对较低。金属矿物黄铁矿实验式为 $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_2$,其中 x 一般 0.051~0.079 的变化,总体成分较为稳定;毒砂成分与标准结构式比较,具有更高的砷含量和较低的铁含量。

金属矿物以硫化物集合体形态产出,在隐爆角砾岩体、角砾岩脉矿化类型中,硫化物呈 1.0~5.0 mm 大小不等的豆状球粒散布在灰黑色胶结物基体中(图 5b,图 6a、h),大于 5~10 mm 的往往集中聚合成团块(图 6i),形成块状矿石。密集网脉、稀疏网脉型矿化,其网状裂隙主要被灰黑色矿浆、黄铁矿以及含黄铁矿石英脉充填。

脉石以围岩角砾为主及少量石英团块,角砾成分以石英斑岩为主、晶屑岩屑熔岩为次。

3 隐爆角砾岩成矿—分带特征

政和东际金(银)矿区隐爆角砾岩筒体与金

(银)矿体一致,矿化类型变化明显,上部多为密集网脉、角砾岩脉型矿化,中部为典型的厚大角砾岩体、角砾岩脉及密集网脉状矿化,下部为间隔式、多管状角砾岩体、角砾岩脉及密集、稀疏网脉状矿化类型。根据矿化强度、蚀变、角砾岩体(脉)及其中胶结物、角砾的成分、大小、形态、可拼贴性等,对隐爆角砾岩筒进行纵向、横向分带。

3.1 纵向分带

纵向上从地表标高 580 m 伏于石英斑岩硅帽之下起,至深部标高-200 m 止(图 2)、横向上北东自 4 线起,至南西 11 线止(图 1c,图 3),产于石英斑岩内的所有矿体、矿化体,均囊括在角砾岩筒之内。

角砾岩筒纵向上可分 5 个相带:

(1) 震裂相:从地表标高 580~510 m(按倾角 30°折算成倾向长度约 140 m),分布于角砾岩筒内部周边,上至地表、下至岩筒根部。靠近隐爆中心一侧发育密集网脉状裂隙及少量角砾岩脉,以穿透性差、岩石整体性好的密集网脉(图 6d)和角砾岩脉型矿化为主(图 6b、c);远离隐爆中心外侧裂隙逐渐减少,为稀疏网脉状矿化类型(图 5j,图 6e)。

(2) 震碎相:发育于隐爆中心外侧周边,介于隐爆相和震裂相之间,下延至上通道相,矿化为角砾岩脉、密集网脉状类型。震碎相岩石碎裂,裂隙多为穿透性贯通(图 6f),其中角砾岩脉常见具树枝状向上分叉(图 6g),角砾大小悬殊,一般 2~30 cm,成分以石英斑岩为主、晶屑熔岩为次,棱角、次棱角状,具有较好的可拼贴性(图 6b、c)。

(3) 隐爆相:510~410 m(倾向长度约 200 m);隐爆相是角砾岩筒核心,横向 0~1~3 线(100 m)、纵向 501~450~416 m 中段(近 200 m)构成巨大的爆炸中心,450 m 中段 1 线为最,形成隐爆角砾岩体矿化类型,构成平均 Au 10 μg/g、Ag 140 μg/g、最高 Au 50.23 μg/g,厚达 20 余米的高品位金银矿体。

表 1 福建政和东际金(银)矿床 450 m、110 m 中段隐爆角砾矿石电子探针分析结果(%)及实验式计算

Table 1 Analysis result(%) electronic-probe breccia ore in the Level 450m, and Level 110m, Dongji gold (silver) deposit, Zhenghe, Fujian

	Fe	O	Au	Ag	Mg	Al	Si	S	Cu	As	Se	Cd	Sb	合计	实验式	矿物名称	标准结构式
1a-4-001	44.53							55.47						100.00%	Fe _{1-0.079} S ₂	黄铁矿	Fe _{1-x} S ₂
1a-4-002	6.26		13.64	80.10										100.00%	Fe _{0.121} Au _{0.075} Ag _{0.803}	含铁金银矿	Ag
1a-4-003	28.36	48.79			1.64	10.33	10.87							99.99%	Fe _{0.457} Mg _{0.327} Al _{3.015} Si _{3.046} O ₂₄	富铁硅酸盐熔浆	
1a-4-004				68.13					4.71	14.17	1.37	2.33	9.29	100.00%	Se _{0.017} Cd _{0.021} Sb _{0.075} Cu _{0.073} As _{0.186} Ag _{0.629}	含锡铜砷银矿	Ag
1a-4-005	18.02							13.13		68.85				100.00%	Fe _{0.790} As _{2.246} S	毒砂	Fe [AsS]
1a-4-006	10.45			33.67				12.72	2.43	40.73				100.00%	Ag _{2.338} Fe _{1.413} Cu _{0.287} As _{4.112} S ₃	硫砷银矿	Ag [AsS ₃]
1a-4-007	17.86							11.93		70.21				100.00%	Fe _{0.860} As _{2.512} S	毒砂	Fe [AsS]
1a-4-008	44.87							55.13						100.00%	Fe _{1-0.066} S ₂	黄铁矿	Fe _{1-x} S ₂
3a-1-001			47.67	52.33										100.00%	Au _{0.333} Ag _{0.667}	金银矿	Ag
3a-1-002	18.25							13.34		68.40				99.99%	Fe _{0.786} As _{2.195} S	毒砂	Fe [AsS]
3a-1-003	46.63				10.80	21.41	21.17							100.01%	Fe _{2.215} Mg _{1.178} Al _{2.103} Si _{2.000}	富铁硅酸盐熔浆	
3a-1-004	45.26							54.74						100.00%	Fe _{1-0.051} S ₂	黄铁矿	Fe _{1-x} S ₂

注:样品在福州大学紫金学院测试中心测试。

隐爆相角砾岩体,角砾大小极悬殊,常见 100 cm 以上巨型角砾,个别甚至可达 5 m,角砾成分以石英斑岩为主、晶屑熔岩次之,角砾呈棱角、长条、撕裂状,形态各异,不具可拼贴性(图 5b、图 6a)。

(4) 上部通道相,410~100 m(扣除断距约 200 m 后,倾向长度约 220 m),本相角砾岩体有别于隐爆相,110 m 中段为多个管状、间隔式排列的角砾岩体(脉)构成,单个角砾岩体(脉)横截面透镜状、次圆状,长径 2~5 m,横跨穿脉硐两硐壁角砾岩脉体往往不完全相连,角砾成分多为石英斑岩,大小 2~10 cm,次圆、次棱角状,不具可拼贴(图 5c、d)。

(5) 下部通道相,100~-200 m(扣除断距约 100 m 后倾向长度约 400 m);为密集—稀疏网脉状矿化类型,仅在-100 m 中段经探矿揭露发现单个角砾岩柱体管道,横截面为 10×30 m。整体上矿体厚度较小,基本稳定在 1~3 m,含 Au 1~3 μg/g 占绝大多数。

3.2 横向分带

横向平面上,围绕隐爆相中心向外大致分为隐爆相、震碎相、震裂相。

隐爆相,其规模大小各中段有所不同,最宽 450 m 中段达 30 余米,501 m 中段以上过渡为脉状角砾岩,416 m 中段以下过渡为间隔式多管状角砾岩体及角砾岩脉。隐爆相仅发育于石英斑岩中,局部与变质岩或火山岩接触,界线清晰截然(图 5g、h)。

震碎相,紧贴隐爆相发育,其宽窄不一,在石英斑岩中宽者可达数米,如果紧挨着的围岩是变质岩或火山岩,一般仅数十厘米甚至可以不发育(图 5i)。

震裂相,发育程度视围岩不同而具有较大差异,在矿体走向上围岩为石英斑岩,该相带长度可达数十米、甚至二百米以上。在倾向上,石英斑岩中震裂相一般宽十余米,如果围岩是变质岩或火山岩,其发育程度明显受限,裂隙密度急剧降低至数条/米并在 3~5 m 内消失。

横向分带矿化强度:从隐爆相—震碎相—震裂相,矿化由强转弱。

3.3 角砾岩筒分带模型

政和东际金矿角砾岩筒包括了所有矿(化)体,整体上 450 m 中段走向延伸最长 550 m,最宽 40 m,而最长、最宽处即是角砾岩筒隐爆最强烈之处;倾向从地表延深至标高-200 m 以下,延伸长度达 960 余米。综合分析剖面、平面分带及各分带矿化类型、矿化强度及规模,角砾岩胶结物、蚀变等特征的差异,

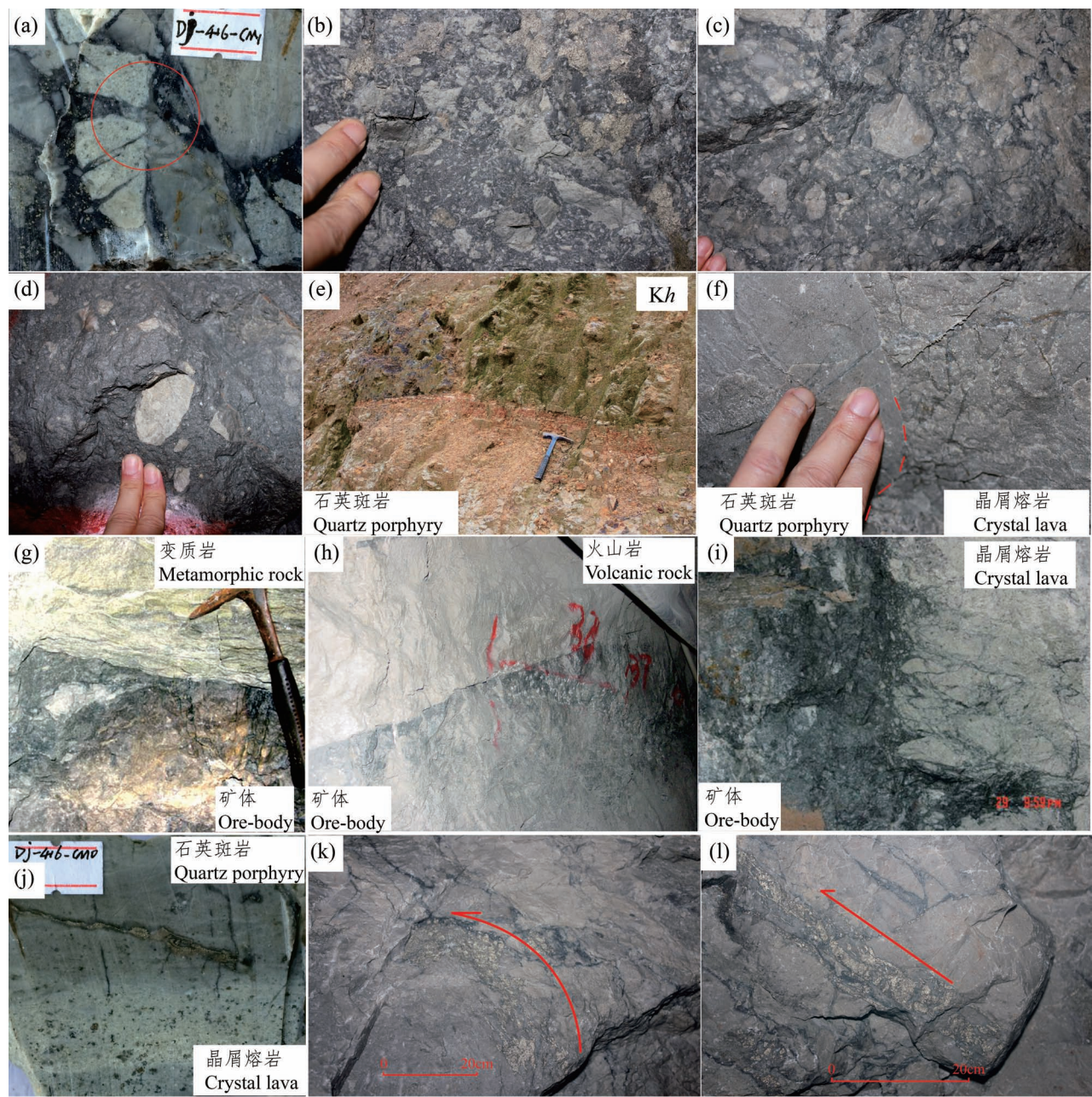


图 5 政和东际矿床石英斑岩与围岩、矿化与围岩接触关系特征

Fig. 5 Characteristics of the contact boundaries between quartz-porphyry—surrounding rock and ore—wallrock in Dongji deposit, Zhenghe County

(a) 刚性晶屑熔岩角砾断成 4 节, 塑性斑岩角砾被压扁挤入刚性角砾中; (b) 上部隐爆矿体中不规则、撕裂状角砾; (c、d) 下部隐爆矿体中次圆状角砾; (e) 石英斑岩侵入于黄坑组 (Kh); (f) 石英斑岩侵入于晶屑熔岩; (g) 矿体侵入于变质岩; (h) 矿体侵入于火山岩; (i) 矿体侵入于火山岩呈爆炸港湾式接触; (j) 黄铁矿线脉从石英斑岩进入晶屑熔岩被终止; (k) 硫化物矿浆旋转构造指示矿浆运动方向; (l) 压扁拉长硫化物矿浆尖端指示矿浆流动方向

(a) A rigid lava-breccia breaks into 4 pieces and soft quartz-porphyry-breccia press into the rigid lava-breccia; (b) irregular or teared breccia in upper cryoexplosion ore; (c, d) rounded—subrounded breccia in lower cryoexplosion ore; (e) quartz-porphyry intruded into the Huangkeng Formation (Kh); (f) quartz-porphyry intruded into crystallinoclastic lava; (g) ore intruded in to metamorphic rock; (h) ore intruded into volcanic rock; (i) ore intruded into volcanic rock, crypto explosion intrusion contact; (j) thin vein of pyrite ore intruded into and stoped in quartz-porphyry; (k) revolve stripped structure of sulfide ore magma, showing direction of ore magma flow; (l) tip of the flattening and elongating sulfide ore magma, showing direction of ore magma flow

表 2 政和东际金矿含矿角砾岩筒垂向分带特征

Table 2 Vertical zoning features of the ore-bearing brecciated pipe in Dongji, Zhenghe County

分带	角砾特征			胶结物	蚀变	矿化类型及强度	
	形态	成分、大小	角砾岩体(脉)				
硅帽	硅帽之下 流化角砾	石英斑岩 2~50 cm	无	硅帽之下,含矿流体 溢出充填	硅帽为石英斑岩岩浆同交 代;硅帽之下成矿流体溢 出蚀变,绢云母化	起隔挡层作用。矿化微 弱,有重要找矿意义	
震裂相	棱角可拼 贴,强	石英斑岩 2~10 cm	角砾岩脉宽 10~100 cm	黄铁矿球粒含矿流 体、矿浆	弱硅化—矿浆 同交代弱硅化	密集网脉、角砾岩脉、稀疏网脉矿化 类型,矿化中等,厚大矿体,中低品 位矿石	
震碎相	棱角次棱 角可拼贴	石英斑岩、晶屑 熔岩 2~30 cm	角砾岩脉宽 10~200 cm	黄铁矿集合体、矿浆	无蚀变	角砾岩脉、密集网脉矿化类型,矿化 强,厚大矿体,中高品位矿石	
隐爆相	次棱角次 圆	石英斑岩、晶屑 熔岩,个别变质 岩 2~100 cm	厚大角砾岩体,450 m 中段最宽 30 m 长近 100 m	黄铁矿集合体、岩屑 岩粉、矿浆	无蚀变	角砾岩体矿化类型,矿化强烈,厚大 富矿集中产出,高一极高品位矿石	
上 通道相	次圆次棱 角	石英斑岩 2~10 cm	横向脉状、透镜状间 隔式排列,纵向长轴 与矿体倾向近平行	黄铁矿球粒岩粉矿浆	弱硅化	角砾岩体、角砾岩脉、密集网脉状矿 化类型,矿化强,通道中心富矿集中	
下 通道相	次圆次棱 角	石英斑岩 2~10 cm	单个透镜状,横截面 10×30 m,向下尖灭	矿浆	弱硅化	密集网脉、稀疏网脉矿化类型,矿化 弱近尾声,薄小矿体,低品位矿石	

建立起角砾岩筒分带模型,其特征列于表 2、分带模型特征示意于图 3 中。

4 矿浆成因特征

4.1 矿体与围岩的接触关系

矿体与石英斑岩接触关系从隐爆中心向外呈有规律的变化:爆炸式脉状贯入(图 6b、c)、震碎碎裂贯入(图 6f)、树枝状脉体贯入(图 6g),以及密集(图 6d)、稀疏状(图 6e)网脉充填贯入接触。矿体与变质岩、火山岩冷硬围岩为突变侵入接触(图 5g、h),也有与火山岩呈爆炸港湾式侵入接触(图 5i),还可以见到矿化细脉沿着石英斑岩小支脉贯入,被限制在两边冷硬的晶屑熔岩内(图 5j)。

4.2 矿石构造

政和东际金(银)矿区矿石构造可分为角砾状构造、密集网脉状构造和稀疏网脉状构造。

角砾状构造:隐爆中心的角砾状矿石,角砾特征前已述及,其胶结物基体由硫化物球粒及细小岩屑岩粉、灰黑色矿浆组成(图 5a、b、c、d,图 6a、c、h、i)。隐爆中心向外辐射至角砾岩脉,脉体宽度逐渐变小,爆炸中心上部角砾以刚性的棱角状、次棱角状、次圆状,可拼贴为特点(图 6b、c),爆炸中心下部角砾多为次圆、次棱角(图 5c、d),胶结物为硫化物球粒及灰黑色矿浆。角砾状构造显示:角砾只经过一次性

破碎、胶结成型,角砾不蚀变、不矿化(图 5a、b、c、d,图 6a、b、c、d、e、j、k),胶结物及其中硫化物是载金体,是引起矿化的根本原因,提示一次性成矿之后再没有“多期次成矿作用”。

密集网脉状构造、稀疏网脉状构造:围绕隐爆中心向外依次展布,其网脉状裂隙是隐爆震碎、震裂的结果,充填物为灰黑色矿浆(图 6a、c、f、g)、黄铁矿细脉(图 6d、e)、含黄铁矿石英细脉(图 5j、l)。

4.3 熔离标型结构

熔离标型结构是熔离矿浆成因的最直接证据,其多见于隐爆相中,熔离标型组构有:

(1)熔离豆状结构(图 6a、h):硫化物呈豆状球粒分散悬浮于灰黑色基体——矿浆中,常见豆状球粒大小 1.0~5.0 mm,滚圆状、椭球状,含量 5%~10%。

(2)熔离团块状结构(图 6i):是熔离豆状结构的进一步发展,小豆粒聚集呈大球粒,大球粒集成团块,即形成块状硫化物。

(3)熔离包裹结构(图 6l):两种熔离体相互包裹,硫化物熔浆液滴被氧化物(磁铁矿)熔浆团所包裹。

(4)筛网状熔离包裹(包晶)结构(图 6j):硫化物熔浆团分别包裹众多角砾,其横切面即成筛网状结构,显示角砾砾间被流动的硫化物熔浆贯入充填,

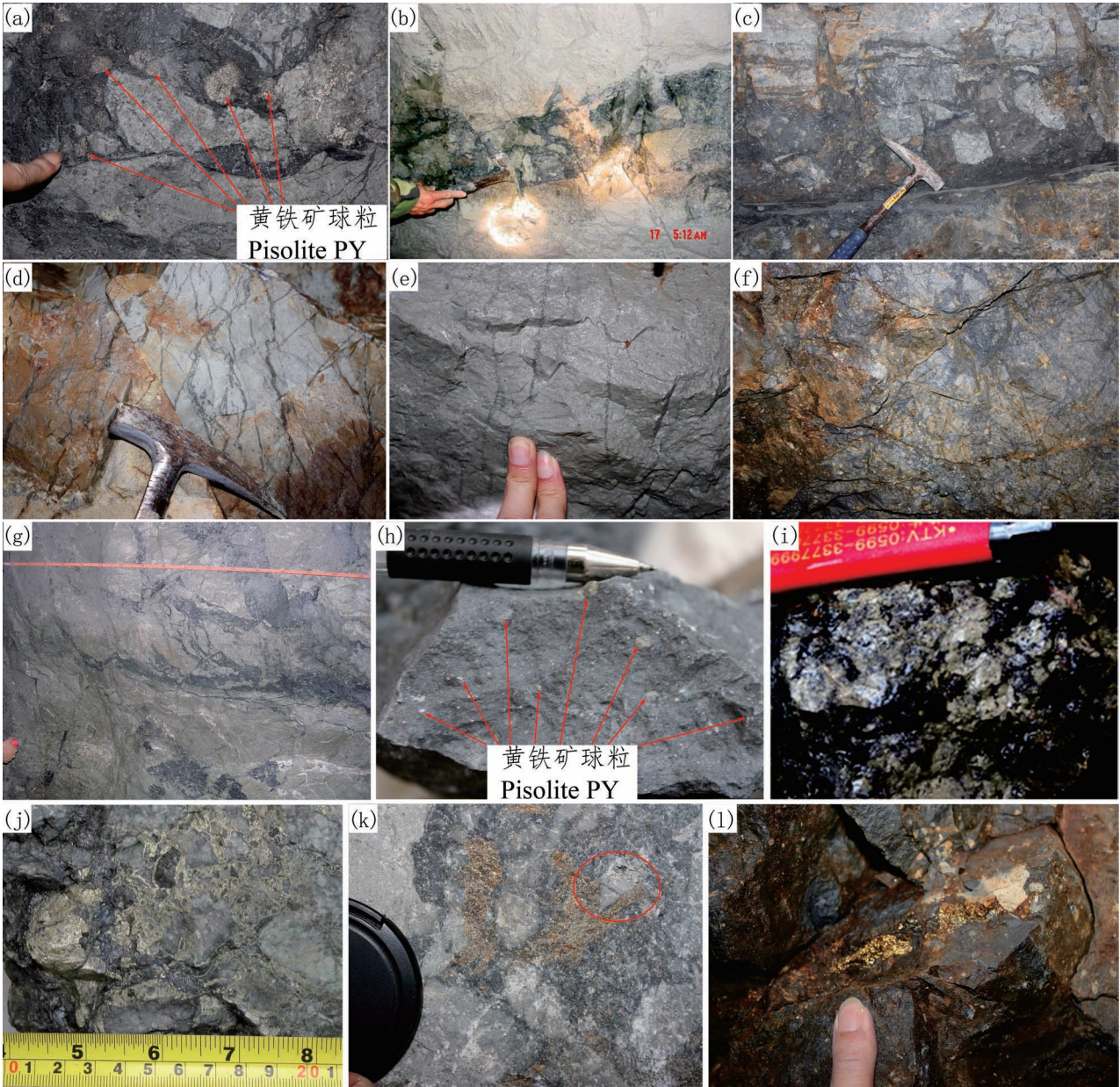


图 6 政和东际矿床矿化类型及矿石结构构造特征: (a) 隐爆角砾岩体矿化类型; (b,c) 角砾岩脉矿化类型; (d) 密集网脉矿化类型; (e) 稀疏网脉矿化类型; (f) 震碎碎裂贯入; (g) 树枝状脉体贯入; (h) 熔离豆状结构; (i) 熔离团块状结构; (j) 筛网状熔离包裹结构; (k) 熔离球体破裂结构; (l) 熔离包裹结构

Fig. 6 Mineralization types and texture, structure characteristics of ores in Dongji deposit, Zhenghe County: (a)—(e) mineralization types: (a) cryptoexplosion breccia body; (b, c) cryptoexplosion breccia veins; (d) dense stockwork; (e) scattered stockwork. (f)—(l) Texture and structure of ores: (f) shatters and shatters into; (g) dendritic veins and intrusion; (h) pisolitic texture of liquation; (i) massive texture of liquation; (j) screen texture of liquation and inclusion; (k) sphere burst texture of liquation; (l) poikilitic texture of liquation

提示隐爆成矿瞬间硫化物熔浆团尚未结晶固结仍处于流动性很强的熔融状态。

(5) 熔离球体破裂结构:硫化物球体被契状尖棱角砾所刺破(图 6k),提示隐爆时硫化物熔浆尚未固结。

4.4 成矿蚀变特征

政和东际金(银)矿最大特点之一是近矿围岩及矿体中几乎不见蚀变。石英脉少得离奇,在隐爆角砾岩体、角砾岩脉矿化类型中未见,密集、稀疏网脉状矿化类型中也很少见及。矿化与围岩只见机械

式接触(图 5g、h、i、j、k、l,图 6b、c、d、e、g),未见化学式蚀变交代接触。隐爆角砾岩体、角砾岩脉中所有角砾,与胶结物边界清晰截然,胶结物的矿化均未渗透到角砾之中(图 5a、b、c、d,图 6a、b、c、j、k)。密集、稀疏裂隙被硫化物、石英细脉充填,脉壁围岩也未见蚀变(图 4l,图 5j、k、l,图 6d、e)。

所见蚀变,于矿体头部被限制在石英斑岩硅帽之下,在 580 mBT2 硅帽(图 4e、f)压顶时产生厚度约 2~3 m 的扁平透镜状深灰色泥化蚀变岩(图 4d);在 620 mBT1 硅帽被矿浆溢出的流体冲破时产生 1~2 m 宽、向上尖灭的裂缝(图 4a),被流体充填后固结成浅灰绿色绢云母蚀变岩(图 4b、c),绢云母岩中常见 5~20 cm 的椭球状“流化角砾”(图 4c),角砾强烈黄铁矿化、硅化、绢云母化蚀变。这些流化角砾是矿浆在上升至石英斑岩硅帽之下时压力、温度下降而分离溢出流体,流体聚集冲撞围岩,围岩碎块掉入沸腾的流体中经过煎熬、翻滚而被造化成滚圆状、椭球状“流化角砾”(章增风,1991)。矿体头、底部可见面状弱硅化:头部弱硅化——石英重结晶、石英细网脉、矿化石英黄铁矿细脉,是矿浆二次沸腾流体所致(有别于石英斑岩岩浆二次沸腾产生的硅帽——没有矿化);底部弱硅化表现为角砾边界略显模糊,为深部压力、温度增高所致。

4.5 矿浆性质讨论

矿浆成分:为灰黑色胶结物——基体,可见的由硫化物球粒、岩屑岩粉、显微重结晶石英颗粒及少

量水云母组成,还有大部分的未见结晶体的不透明基质,分别取自 450 m 中段(1a-4)、110 m 中段(3a-1)角砾状矿石的两组电子探针分析结果见表 1,其影像图见图 7a、b。从表 1 中 1a-4-3、3a-1-3 成分结果分析及图 7a003、b003 的灰黑、黑色视区观察,金属矿物晶间的充填物为富铁硅酸盐熔浆的冷却物,未见与硅酸盐矿物成分匹配,可能是富铁熔浆—矿浆骤冷固结产物。

矿浆温度:研究认为硫化物熔浆的开始结晶温度一般为 600~700 ℃,部分只有 300 ℃(斯米尔诺夫,1981),王润民等(1987)也认为金属硫化物在 450 ℃以上开始结晶。政和东际金(银)矿矿体中硫化物发育多种熔离标型组构,提示了在矿浆隐爆时硫化物熔浆团仍处于未结晶的熔融状态,所以估计矿浆侵入、爆炸定位成矿时温度至少在 300~450 ℃以上。

矿浆黏度:矿脉与围岩呈侵入接触,接触面未见蚀变,一是快速侵位、固结,没有充分时间作物质交换,二是缺少化学活性高的流体对围岩的蚀变交代。政和东际矿区仅仅在矿体头部石英斑岩硅帽之下发现绢云母蚀变岩,说明原本矿浆体系与流体体系的混合体,在近地表压力、温度降低时混合体发生矿浆和流体的解耦使得部分流体溢出(罗照华等,2007)。而绢云母蚀变岩出现,同理说明矿浆中含有一定量流体,而流体能极大降低矿浆黏度促使其快速上升(王俊,2013;苏尚国等,2014)。从发育筛

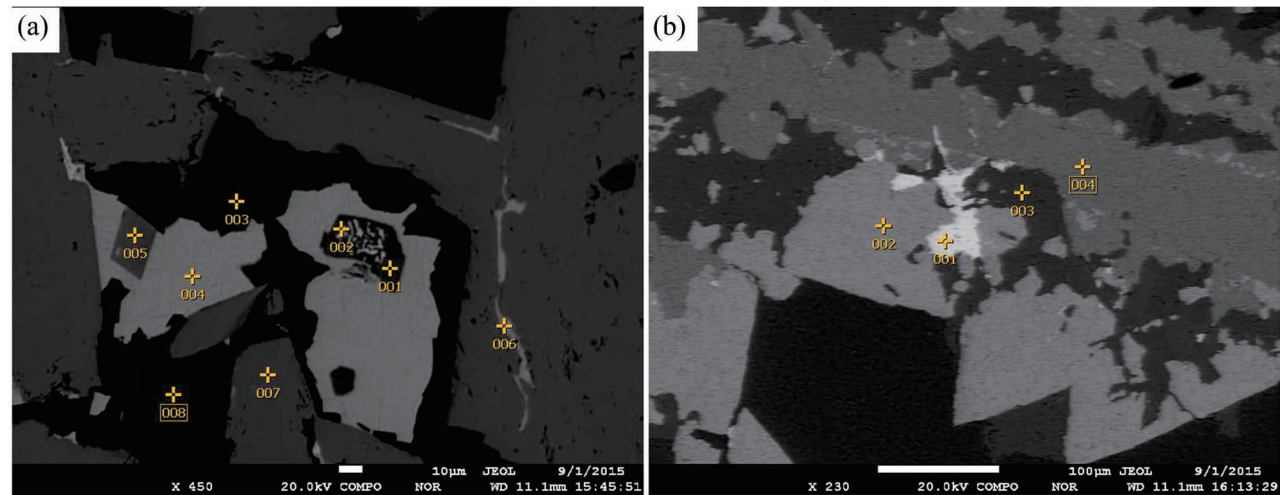


图 7 政和东际金(银)矿金银矿物赋存状态及矿浆胶结物微观特征(电子显微镜下)
Fig. 7 Occurrence state of gold and silver minerals and microscopic characteristics of ore magma cements of the Dongji gold (silver) deposit in Zhenghe County (under electron microscope)
(a) 黑色区(003 号点);(b) 黑色区(003 号点),可能为富铁硅酸盐熔浆
(a) Black area(point 003); (b) black area (point 003), may be iron-rich silicate magma

网状熔离标型组构的硫化物熔浆团判断其具有较好的塑性及流动性,另外根据郭正府(1994)研究球粒黏度比基体大的原则,估计作为基体的矿浆比球粒状硫化物熔浆团具有更高的可流动性。这些现象说明矿浆—富铁硅酸盐熔浆具有比硫化物熔浆更低的黏度。

矿浆密度:取灰黑色胶结物,尽量排除角砾及硫化物集合体,通过体重测量,密度平均为 3.2 g/cm^3 ,考虑到成矿时流体溢出,用矿石测定比重,数值应该偏大,所以估计矿浆密度略小于 3.0 g/cm^3 更合适。

压力推测,既然矿浆都聚集到产生大规模爆炸,其压力已经远超围岩静压力。

综上所述,可以推测政和东际金(银)矿成矿矿浆是中高温 $300\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ (硫化物熔浆开始结晶的温度)、超高压、流动性较好的低黏度、大密度 (3.0 g/cm^3)、溶有少量流体(体积的 $10\%\sim 20\%$?)的富铁硅酸盐、硫化物熔浆混合物。

5 矿浆(运移)动力学过程特征

“矿浆”(ore magma),原意即指生成矿石的岩浆,认为“很多是来源于地下除岩浆之外尚有与之并存的矿浆”(苏良赫,1984),具有岩浆属性,运用岩浆动力学研究方法,对矿浆运移动力学过程研究是基本适用的。徐兴旺等(2006)对岩浆运移研究进行了系统的综述,指出岩浆运移动力学研究内容包括 5 个方面:运移方式、运移通道、运移途径、运移动力与运移过程的成矿作用。

5.1 矿浆卸载定位成矿的边界条件

政和东际金(银)矿成矿的边界物理性状清晰可辨。容矿石英斑岩岩浆沿着发育于小溪组(JK_x)火山喷出岩和基底变质岩(Zdx)交界附近的火山环状断裂薄弱带侵入,于近地表浅部定位时,在“岩浆二次沸腾”作用下,溢出流体在斑岩头部发生“同岩浆交代蚀变作用”(罗照华等,2009),形成致密的硅帽即隔挡层(图 4a、e、f)。石英斑岩周边围岩是小溪组(JK_x)的岩屑晶屑熔岩。于是形成了上部以硅帽为隔挡层、周边以熔岩为围岩、内部尚未固结的石英斑岩为容矿空间(形似袋口朝下的口袋)。

定位深度,王波涛等(2019)研究认为本矿为浅成低温热液矿床,定位深度 $0.4\sim 2.0\text{ km}$;李国华(2008)对东南沿海火山岩剥蚀深度的研究认为剥蚀速率约为 $2.5\sim 3.0\text{ km}/100\text{ Ma}$ 。政和东际金(银)矿成矿(约 100 Ma)后经剥蚀刚刚露出头部,

笔者倾向取剥蚀深度的研究结果上限及地质估计的下限,认为成矿定位深度为古地表之下 $2.0\sim 2.5\text{ km}$ 。

5.2 矿浆运移通道

张旗等(2013)研究岩浆热场温度,认为在岩浆侵入后 0.2 Ma 保持 $700\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.5 Ma 保持 $600\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$,持续 1.0 Ma 仍在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,这对“灾变式”的成矿事件,时间足够了。成矿矿浆只有沿着“岩浆热场通道”才能顺利上升到达地表,否则遇到冷的围岩条件就会固结定位在深部。证据表明石英斑岩角砾相对于熔岩角砾塑性得多,更易于改造成次圆、拉长压扁状(图 5a),受隐爆破碎也更容易得多,从隐爆中心向外震裂裂隙带沿石英斑岩走向长达 200 多米,裂隙一进入冷、硬的晶屑岩屑熔岩就骤然减少,细脉状矿化随之终止(图 2 中岩芯照片,图 5j),可见石英斑岩处于岩浆侵入尚未完全冷却、固结的塑性状态,并具有“岩浆热场”高温属性,形成通畅的矿浆运移通道——“岩浆热场通道”。

矿浆在岩浆热场通道中运移,留下的流动遗迹:硫化物熔浆团包裹角砾、硫化物熔浆球粒被压扁拉长,其尖端(图 5l)、旋转构造(图 5k)指向矿浆向上流动方向。

5.3 矿浆起源推测

政和东际金(银)矿所处中国东南沿海中生代陆相火山岩带北段,该火山岩带北起浙江、经福建、南至广东,南北长大于 1000 km ,东西宽 $200\sim 300\text{ km}$,相邻永泰—德化地区火山岩地质专题研究成果(冯宗帜等,1991),早白垩世火山岩岩浆具有明显的基性—中酸性双峰式组合。近年来岩浆熔离分异演化说得到重新重视,双峰式火山岩成因可以解释为壳幔深处岩浆熔离分异形成,在下地壳与上地幔的深处,由岩浆熔离出的富硅、富铁熔浆,在富铁熔体中富集过渡金属元素、碱土金属元素、稀土元素和高场强元素;而富硅熔体中富集 Si、Al 及碱金属元素(王坤等,2017)。富硅熔浆先上侵形成大规模火山喷发—东南沿海超级火山喷发带,富铁熔浆由于自身的亲疏性,一是聚集过饱和硫熔离出硫化物液滴,二是俘获了大量硫化物熔浆(硫化物熔浆团富含成矿元素),形成富铁熔浆加硫化物熔浆的混合物——矿浆,在深部“拆离带储集”滞留(罗照华等,2009)。肖凡等(2015,2020)研究本矿床黄铁矿硫源于壳幔过渡带也支持矿质来源于深部。据此认为政和东际金(银)矿矿浆即是来源于壳幔深处富铁熔浆聚集了富含金银的硫化物液滴的熔浆混合

物。

5.4 矿浆运移动力

冯宗帜等(1991)依据早白垩世双峰式火山岩组合,根据 Sr、Nd 同位素数据分析认为岩浆属于壳幔混源型,提出中生代时期福建东南沿海受“深大断裂抑或裂谷作用”,在近壳幔边界 28~31 km(王培宗等,1993)地幔隆起、热流上升,促使上地幔、下地壳部分熔融,地壳减薄致使大规模岩浆上升、喷发、侵入,造就了超级火山喷发以及火山喷发期后的潜火山岩浆侵入。处于区域上火山喷发背景下,上地幔持续隆升引发的驱动力,导致矿浆沿着石英斑岩开拓的岩浆热场通道上升侵位。矿浆上升动力一定有个强大的外力推动,作为这一点外力,不难想象,地幔上涌、下地壳熔融导致岩浆大规模喷发,要携带这样一股小小的矿浆沿着潜火山岩“岩浆热场通道”上升到地表,显得轻而易举。

5.5 矿浆运移方式

容矿石英斑岩为潜火山岩,产状为一席状岩墙,潜火山岩岩浆沿着东坑火山洼地西部周边环状内倾断裂、又是晚侏罗纪火山喷出岩与基底变质岩接触带附近的薄弱带上侵定位,属于“破裂—岩墙运移模式”,研究认为岩墙式运移速率可达 31.5 km/a(徐兴旺等,2006),假设该岩浆从下地壳 30 km 深处上侵,一年就可以达到地表位置。

本矿区切割矿体的正长斑岩,用被其从深部携带上侵的基性岩包体,按罗照华等(2009)推荐的 Stock 定律计算公式:

$$v = \frac{2gr^2(\rho_s - \rho_l)}{9\eta}$$

来估算岩浆上侵速率,式中 v 为固体在液体中下沉的速率(cm/s), g 为重力加速度(980cm/s^2), r 为包体的半径(cm), ρ_s 为包体密度(g/cm^3), ρ_l 为液体密度(g/cm^3), η 为液体的黏度($1\text{ poise} = 0.1\text{ Pa}\cdot\text{s}$),假定正长斑岩岩浆黏度为玄武岩 1000 poise 的 100 倍,假设基性岩包体密度为 3.0 g/cm^3 、正长斑岩岩浆密度 2.6 g/cm^3 ,则基性岩包体在正长斑岩岩浆中沉降速率为 0.087 cm/s ,也即 27 km/a 。如此正长斑岩岩浆上升速率要大于基性岩包体的下沉速率,才能将包体带上地表。假设地壳厚度 30 km,正长斑岩岩浆从 30 km 深的壳幔边界上侵,1 年就可以达到地表,可见其上升速率是很快的。

同理,假定矿浆密度 3.0 g/cm^3 、黏度比玄武岩低一个数量级(为 100poise),硫化物球粒密度 4.5 g/cm^3 ,球粒半径 0.5 cm,计算出硫化物球粒在矿浆

中沉降速率为 0.817 cm/s ,也即 254 km/a 。如果矿浆在壳幔边界 30 km 处滞留聚集,只要上升机制被激发,50 d 之内就可以到达古地表预定卸载的成矿位置。矿浆有如此快速上升速率就不难理解在其被隔挡在石英斑岩硅帽之下聚集,产生的瞬时、强大压力足以引发“浆爆”结果。虽然这 50 d 数字不一定很准确,也足见其成矿作用不再是长期、多期次的漫长过程,而是一场惊心动魄的灾变、爆炸瞬间。

5.6 矿浆运移途径及终端卸载成矿

矿浆含有一定量的流体,在深部高温高压起源储集端二者是耦合在一起的(罗照华等,2007),流体对矿浆的流动性起到促进作用,在强大的外驱动力推动下沿途一路高歌猛进,是否在哪里(岩浆房)歇歇脚暂停过,尚无资料证明。矿浆运移至近古地表 2.5 km 石英斑岩硅帽隔挡层之下的终端处聚集,压力、温度下降,矿浆中少量流体在头部溢出,余下更多、“更干”的矿浆在石英斑岩“口袋”中集聚,迅速堆积的矿浆造成超压、能量飙升,最终引发一场灾变式的大爆炸。爆炸中心形成隐爆角砾岩体型矿化,爆炸引起强大的冲击波在不同介质间传递推进(李顺波等,2009),塑性状态下的石英斑岩内能量传递迅速,形成由爆炸中心向外的震碎、震裂破碎裂隙,获得爆炸动能的矿浆,强力喷射、挤入其中,依次形成了角砾岩脉—密集网脉—稀疏网脉型矿化。强大的冲击波冲击坚硬围岩其击穿能力大大降低,并迅速消失,所留下的稀疏震裂裂隙被少量漏出的矿浆所充填。同时爆炸形成的空间,迅速被进一步上升的矿浆所填堵,沿途留下间隔、管道式的通道、矿浆流动的遗迹,上侵矿浆尾部急剧收敛、矿化结束,所形成厚度小、矿化强度低的从密集网脉到稀疏网脉的矿化类型的终结。

综上所述,政和东际金(银)矿成矿过程:东坑火山洼地白垩纪火山喷发进入尾声(106 Ma)→火山洼地塌陷→火山断裂复活→潜火山岩岩浆侵入→岩浆热场通道形成→矿浆上侵→爆炸→形成角砾岩筒→矿浆在筒里各就各位成型(图 3)→正长斑岩侵入(96 Ma)切割矿体,长期的应力释放,重力作用下的阶梯式正断层将矿体切割成 3 大段,成为三个赋矿台阶(图 2),这便是矿浆隐爆角砾岩型金(银)矿成矿作用的全过程。

6 结论

(1)政和东际金(银)矿为矿浆隐爆角砾岩型,其矿浆来源于壳幔过渡带深部中酸性岩浆熔离的富

铁熔浆部分,经过侧向迁移、“源地”储集并俘获含矿硫化物熔浆,形成富含金银成矿元素的混合矿浆。

(2)矿浆被外力驱动沿着石英斑岩岩浆热场通道上侵,在古地表之下 2.0~2.5 km 深处、斑岩头部硅帽阻挡层之下,矿浆持续聚集,形成极端超压,最终引发瞬间的大爆炸,定位形成隐爆角砾岩筒式矿体。

(3)石英斑岩为容矿围岩,不含成矿流体,与矿床成因无关,“浅成—低温—潜火山热液”不是政和东际金(银)矿的成因类型,应该是深部熔离矿浆—贯入—隐爆—定位成矿,即“浅成—中高温—矿浆隐爆角砾岩型”金(银)矿矿床。石英斑岩作为潜火山岩,自身没有含矿的“潜火山热液”,理论上深部也不会存在“斑岩矿床”,实际上钻探验证表明隐爆角砾岩筒尾部在石英斑岩中收敛、矿化随之结束。

(4)政和东际金(银)矿属“矿浆隐爆角砾岩型金矿”,作为“隐爆角砾岩型金矿”大家族中新成员,该新类型的发现,已经推进东坑火山洼地西部周边的同类型金矿找矿工作,在更大范围内也将有助于拓展东南沿海中生代陆相火山岩区找矿新思路。

致谢:0 m 标高以上是福州东鑫矿业技术公司集体找矿成果,本文引用了采矿权业主山东黄金股份公司政和源鑫矿业公司对 0 m 标高以下探矿验证结果。在深部验证工作中进行了有益探讨,提高了矿床的研究程度,笔者等受益匪浅,在此深表感谢。

注 释 / Notes

- ① 福建省地质矿产局. 1987. 中华人民共和国 1:50000 政和、川石、后山幅区域地质调查及矿产普查报告.
- ② 福州东鑫矿业技术公司. 2012. 福建省政和县东际矿区金(银)矿资源储量核实地质报告.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

福建省地质调查研究院. 2016. 中国区域地质志. 福建志. 北京:地质出版社:370.

福建省地质矿产局. 1997. 福建省岩石地层. 武汉:中国地质大学出版社:160~162.

傅德彬. 1983. 基性—超基性岩硫化铜镍矿浆形成机理及成矿作用特征. 吉林地质,2(2):12~24.

傅德彬. 1994. 吉林赤柏松硫化铜—镍矿床的矿浆成因模式. 地质学报,68(2):142~157.

方华,姚家栋,何大贵,江琴生. 1985. 论岩浆深部分异在硫化铜镍矿床成岩成矿作用中的意义. 地质学报,59(2):141~154.

冯宗帜,卞润章,黄水兴,李进堂,许美辉,邹永兴,吴志勤,王国金,何文兴. 1991. 福建永泰—德化地区火山地质及火山岩含矿性. 见:南京地质矿产研究所所刊(增刊),9:80~84.

郭正府. 1994. 岩浆不混溶作用过程中的岩浆动力学条件. 地质地球化学,23(6):19~21.

侯增谦. 1987. 岩浆不混溶的物理化学条件—以河北阳原杂岩体为例. 岩石矿物学杂志,23(3):212~220.

侯增谦. 1990a. 河北阳原—矾山环状杂岩体的岩浆不混溶成因及矾山式铁磷矿床成因探讨. 矿床地质,9(2):119~128.

侯增谦. 1990b. 河北阳原岩体辉石岩—正长岩组合与岩浆不混溶作用. 现代地质,4(2):53~64.

李国华. 2008. 论漳州盆地的成因—是差异侵蚀盆地而非断陷盆地. 地质论评,54(2):199~206.

李建康,张德会,王登红,张文淮. 2008. 富氟花岗岩岩浆液态不混溶作用及其成岩成矿效应. 地质论评,54(2):175~183.

李顺波,东兆星,齐燕军,焦金锋. 2009. 爆炸冲击波在不同介质中传播衰减规律的数值模拟. 振动与冲击,28(7):115~117.

刘永发. 2011. 福建政和东际金(银)矿床地质特征及成因初析. 福建地质,30(01):21~28.

刘曰富,周鑫,郭新利. 2019. 福建东际金矿成矿地质条件分析. 矿产勘查,10(4):885~889.

骆华宝. 1990. 中国主要硫化铜镍矿床及其成因研究. 导师:陈正. 付导师:岳树勤. 北京:中国地质科学院博士学位论文:1~102.

罗镇宽,苗来成,关康. 1999. 角砾岩型金矿床:一种值得重视的金矿床类型. 地质找矿论丛,14(4):15~23.

罗照华,卢欣祥,陈必河,李明立,梁涛,黄凡,杨宗锋. 2009. 透岩浆流体成矿作用导论. 北京:地质出版社:35~74.

罗照华,莫宣学,卢欣祥,陈必河,柯珊,侯增谦,江万. 2007. 透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据. 地学前缘,14(3):165~183.

卢冰,胡受奚,蔺雨时,叶水泉. 1990. 宁芜型铁矿床成因和成矿模式的探讨. 矿床地质,9(1):13~25.

卢燕,周延,张红亮,杨凯,陈世忠,隰弯弯,修连存,邢光福. 2017. 福建政和东际金—银矿床的热液蚀变特征及其勘探指示意义. 地质与勘探,53(6):1039~1050.

毛光武,严卸平,舒文辉,祖俊龙,王波涛,白昌华. 2016. 隐爆角砾岩型金矿的研究进展. 地质找矿论丛,31(3):396~408.

卿敏,韩先菊. 2002. 隐爆角砾岩型金矿述评. 黄金地质,8(2):1~7.

宋保昌,张宝林,王杰,徐兴旺. 2002. 隐爆角砾岩金矿的成矿机理探讨. 矿床地质(增刊),21:662~665.

宋学信,陈毓川,盛继福,艾永德. 1981. 论火山—浅成矿浆铁矿床. 地质学报,55(1):41~54.

苏良赫. 1984. 液相不共溶在岩石学及矿床学中的重要性. 地球科学—武汉地质学院学报,24(1):1~12.

苏尚国,汤中立,罗照华,邓晋福,伍光英,周美夫,宋晨,肖庆辉. 2014. 岩浆通道成矿系统. 岩石学报,30(11):3120~3130.

斯米尔诺夫·B·И. 1981. 矿床地质学. 《矿床地质学》翻译组. 译. 北京:地质出版社.

唐菊兴. 1995. 含金热液隐爆角砾岩的特征及研究意义. 成都理工学院学报,22(3):59~64.

谭劲,赵珊茸,莫宣学,邓晋福. 1997. 岩浆不混溶对岩石成分和结构的控制——川西乡城地区坡坎安山岩成岩特征探讨. 地球科学——中国地质大学学报,22(2):165~170.

谭劲,莫宣学,赵珊茸,邓晋福. 1998. 岩浆不混溶分异过程动力学分析. 岩石学报,14(1):84~90.

汤中立,任端进. 1987. 中国硫化镍矿床类型及成矿模式. 地质学报,61(4):350~360.

汤中立. 1990. 金川硫化铜镍矿床成矿模式. 现代地质,4(4):55~64.

王波涛,严卸平. 2019. 福建政和东际金矿床流体包裹体特征. 中国金属通报,(1):41~42.

- 王坤,董欢,曹永华,武晓霖. 2017. 中基性岩浆的不混溶作用及存在问题. 地质论评, 63(3): 739~752.
- 王俊. 2013. 岩浆通道成矿系统中铜镍硫化物矿浆上升机制. 导师: 苏尚国, 北京: 中国地质大学硕士学位论文; 1~41.
- 王联魁, 朱为方, 张绍立. 1983. 液态分离—南岭花岗岩分异方式之一. 地质论评, 29(2): 365~373.
- 王培宗, 陈耀安, 曹宝庭, 潘金滇, 王长炎. 1993. 福建省地壳—上地幔结构及深部构造背景的研究. 福建地质, 12(2): 79~158.
- 王润民, 李楚思. 1987. 新疆哈密黄山东铜镍硫化物矿床成岩成矿的物理化学条件. 成都地质学院学报, 14(3): 1~9.
- 肖凡, 班宜忠. 2015. 福建省政和县东际金(银)矿床硫、铅同位素和黄铁矿成分标型研究. 矿物学报, 35(增刊): 77.
- 肖凡, 班宜忠, 范飞鹏, 许乃岑, 毛光武, 李凤春. 2020. 福建政和东际金(银)矿床黄铁矿微量元素和硫—铅同位素及锆石年龄研究. 中国地质, 47(2): 375~390.
- 徐兴旺, 王杰, 张宝林, 秦克章, 蔡新平. 2006. 岩浆运移动力学及其研究进展. 地球科学进展, 21(4): 361~371.
- 袁家铮, 张峰, 殷纯毅, 邵宏翔. 1997. 梅山铁矿矿浆成因的系统探讨. 现代地质, 11(2): 170~176.
- 张会琼, 王京彬, 王玉往. 2012. 山西灵丘支家地铅锌银隐爆角砾岩筒的岩相分带性研究及其勘查意义. 地质论评, 58(6): 1046~1055.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 焦守涛. 2013. 地热场中“岩浆热场”的识别及其意义. 地球物理学进展, 28(5): 2495~2507.
- 张荣华. 1979. 长江中下游玢岩铁围岩蚀变的地球化学分带. 地质学报, 53(2): 137~153.
- 朱玉磷, 刘永发, 张金塔. 2009. 福建德化下坂斑岩金矿地质特征及成因探讨. 福建地质, 28(1): 21~35.
- 章增凤. 1991. 隐爆角砾岩的特征及其形成机制. 地质科技情报, 10(4): 1~5.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Fujian Province. 1997#. Rock-stratigraphy Unit. Wuhan: Publishing House of China Geological University: 160~162.
- Fu Debin. 1983#. The metallogenic mechanism of the basic and ultra-basic copper—nickel sulphide ore magma and its ore-forming characteristics. Geology of Jilin, 2(2): 12~24.
- Fu Debin. 1994#. A genetic model for ore magma of the Chibaisong copper—nickel sulphide deposit, Jilin. Acta Geological Sinica, 68(2): 142~157.
- Fang Hua, Yao Jiaodong, He Dagui, Jiang Qinsheng. 1985#. The significance of deep-seated magmatic differentiation in the rock- and ore-forming processes of copper—nickel sulfide deposits. Acta Geological Sinica, 59(2): 141~154.
- Feng Zhongzhi, Qi Renzhang, Huang Shuixing, Li Jintang, Xu Meihui, Zhou Yongxing, Wu Zhiqing, Wang Guojin, He Wenxing. 1991#. Mesozoic volcanology and mineralization related to volcanics in Yongtai—Dehua district, Fujian Province. Bulletin of the Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Supplement No. 9: 80~84.
- Geology Survey of Fujian Province. 2016#. The Regional Geology of China, Fujian Province. Beijing: Geological Publishing House: 1~370.
- Guo Zhengfu. 1994#. The magma dynamic condition of silicate liquid unmixing process. Geology Geochemistry, 23(6): 19~21.
- Hou Zengqian. 1987#. The physicochemical condition of silicate liquid immiscibility—An example form Yangyuan complex, Hebei. Acta Petrologica et Mineralogica, 23(3): 212~220.
- Hou Zengqian. 1990a#. Silicate liquid immiscibility of the Yangyuan—Fanshan complex in Hebei Province and the origin of the Fanshan type phosphorus deposit. Mineral Deposit, 9(2): 119~128.
- Hou Zengqian. 1990b#. The pyroxenite—syenite suite of Yangyuan complex in Hebei Province and silicate liquid immiscibility. Geoscience, 4(2): 53~64.
- Li Guohua. 2008#. Discussion on genesis of the Zhangzhou basin—A diffrencially eroded basin rather than a fault-depressed basin. Geological Review, 54(2): 199~206.
- Li Jiankang, Zhang Dehui, Wang Denghong, Zhang Wenhui. 2008#. Liquid immiscibility of fluorine-rich granite magma and its diagenesis and metallogeny. Geological Review, 54(2): 175~183.
- Li Shunbo, Dong Zhaoxing, Qi Yanjun, Jiao Jinfeng. 2009#. Numerical simulation for spread decay of blasting shock wave in different media. Journal of Vibration and Shock, 28(7): 115~117.
- Liu Yongfa. 2011#. The geologic characteristics of the Dongji gold deposit in Zhenghe County, Fujian Province. Geology of Fujian, 30(1): 21~28.
- Liu Rifu, Zhou Xin, Guo Xinli. 2019#. Analysis of Dongji gold deposit metallogenic geologic conditions. Zhenghe County. Fujian. Mineral Exploration, 10(4): 885~889.
- Luo Huabao. 1990#. The Major Nickel—Copper Sulfide Deposit and Their Genesis of China. Tutor: Chen Zheng, Yue Shuqin. Doctor degree thesis of Chinese Academy of Geological Sciences: 1~102.
- Luo Zhenkuan, Miao Laicheng, Guan Kang. 1999#. Breccia-hosted Au deposit—An Au deposit type to which attention should be paid. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 14(4): 15~23.
- Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Chen Bihe, Li Mingli, Liang Tao, Huang Fan, Yang Zongfen. 2009#. Introduction to metallogeny by transmagmatic fluids. Beijing: Geological Publishing House: 35~74.
- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, Chen Bihe, Ke Shan, Hou Zengqian, Jiang Wan. 2007#. Metallogeny by trans-magmatic fluids—theoretical analysis and field evidence. Earth Science Frontiers, 14(3): 165~183.
- Lu Bing, Hu Shouxi, Lin Yushi, Ye Shuiquan. 1990#. A discussion on genesis and metallogenic model of Ningwu-type iron deposits. Mineral Deposit, 9(1): 13~25.
- Lu Yan, Zhou Yan, Zhang Hongliang, Yan Kai, Chen Shizhong, Xi Wanwan, Xiu Liancun, Xing Guangfu. 2017#. Hydrothermal alteration and its significance for exploration at the Dongji gold—silver deposit in Zhenghe, Fujian province. Geology and Exploration, 53(6): 1039~1050.
- Mao Guangwu, Yan Xieping, Shu Wenhui, Zu Junlong, Wang Botao, Bai Changhua. 2016#. Research progresses on cryptoexplosion breccias type gold deposits. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 31(3): 396~408.
- Qing Min, Han Xianju. 2002#. A commentary of cryptoexplosion breccia type gold deposits. Gold Geology, 8(2): 1~7.
- Song Baochang, Zhang Baolin, Wang Jie, Xu Xingwang. 2002#. Discuss on minerogenesis mechanism of crypto-explosion type gold deposit. Mineral Deposits, 21(Supp.): 662~665.
- Song Xuexin, Chen Yuchuan, Sheng Jifu, Ai Yongde. 1981#. On iron deposits fore volcanogenic hypabyssal ore magma. Acta Geological Sinica, 55(1): 41~54.
- Spurr J E. 1923. The Ore Magma.
- Su Lianghe. 1984#. The importance of liquid immiscibility in petrology and mineral deposits. Earth Science, 24(1): 1~12.

- Su Shangguo, Tang Lizhong, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Wu Guangmei, Zhou Meifu, Song Chen, Xiao Qinghui. 2014&. Magmatic conduit metallogenic system. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11):120~130.
- Tang Juxing. 1995&. Characteristics and study significance of gold-bearing hydrothermal cryptoexplosion breccias. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 22(3):59~64.
- Tan Jing, Zhao Shanrong, Mo Xuanxue, Deng Jinfu. 1997&. Magma immiscible controlling rock composition and texture: Discussion on boninite. *Earth Science*, 22(2):165~170.
- Tan Jing, Mo Xuanxue, Zhao Shanrong, Deng Jinfu. 1998&. Dynamic analysis of immiscible differentiation process of magma. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1):84~90.
- Tang Zhongli, Ren Ruijin. 1987&. Types and metallogenetic models of nickel sulfide deposit in china. *Acta Geological Sinica*, 61(4):350~360.
- Tang Zhongli. 1990&. Minerogenetic model of the Jinchuan copper and sulfide deposit. *Geoscience*, 4(4):55~64.
- Wang Botao, Yan Xieping. 2019&. Feature liquid inclusion of gold deposit in Zhenghe County. Fujian. *Metallic Bulletin of China*, (1):41~42.
- Wang Kun, Dong Huan, Cao Yonghua, Wu Xiaoji. 2017&. Research status and exiting problems of liquid immiscibility in intermediate—basic magma. *Geological Review*, 63(4):739~752.
- Wang Jun. 2013&. The Uprising Mechanism of Cu—Ni Sulfide Magma in Magmatic Conduit Metallogenic System. Tutor: Su Shangguo. Master degree thesis of China University of Geosciences(Beijing):1~41.
- Wang Liankui, Zhu Weifang, Zhang Shaoli. 1983&. Liquid segregation—one of the main modes of differentiation of the nanling granite. *Geological Review*, 29(2):365~373.
- Wang Peizong, Chen Yaoran, Cao Baoting, Pan Jindian, Wang Changyan. 1993&. Crust—upper-mantle structure and deep structure setting of Fujian Province. *Geology of Fujian*, 12(2):79~158.
- Wang Runmin, Li Chunsu. 1987&. Physicochemical condition of rock formation and mineralization of Huangshandong magmatogenic sulfide deposit, Hami, Xinjiang. *Journal of Chengdu College of Geology*, 14(3):1~9.
- Xiao Fan, Ban Yizhong. 2015&. Trace elements of pyrite from the Dongji Au (Ag) deposit in Zhenghe County, Fujian Province. *Geology in China*, 35(Supp.):77.
- Xiao Fan, Ban Yizhong, Fan Feipeng, Xu Naicen, Mao Guangwu, Li Fengchun. 2020&. Research on zircon U—Pb, S—Pb isotopes and trace elements of pyrite from the Dongji Au(Ag) deposit in Zhenghe County, Fujian Province. *Geology in China*, 47(2):375~393.
- Xu Xingwang, Wang Jin, Zhang Baolin, Qin Kezhang, Cai Xinping. 2006&. Transport dynamics of magma and advances. *Advances in Earth Science*, 21(4):361~371.
- Yuan Jiazheng, Zhang Feng, Yin Chungu, Shao Hongxiang. 1997&. Systematical study on ore-magma genesis of meishan iron deposit. *Geoscience*, 11(2):170~176.
- Zhang Huiqiong, Wang Jingbin, Wang Yuwang. 2012&. A study on lithofacies zonation of crypto-explosive breccia pipe in Zhijiadi Pb—Zn—Ag deposit, Lingqiu County, northeastern Shanxi Province and its exploration significance. *Geological Review*, 58(6):1046~1055.
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, Jiao Shoutao. 2013&. Identification and implication of magma thermal field in the geothermal field. *Progress in Geophysics*, 28(5):2495~2507.
- Zhang Ronghua. 1979&. On geochemical zoning of the altered country rock of the porphyrite iron in the middle—lower changjiang valley. *Acta Geological Sinica*, (2):137~153.
- Zhu Yulin, Liu Yongfa, Zhang Jinta. 2009&. On the geologic characteristics and genesis of the Xiaban porphyritic gold mine in Dehua County, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 28(1):21~35.
- Zhang Zengfeng. 1991&. General features and genetic mechanism of crypto-explosive breccias. *Geological Science and Technology Information*, 10(4):1~5.
- Смирнов В.И. 1981#. *Geology of Deposit (in Chinese, Translated from Russia)*. Beijing: Geological Publishing House.

Metallogenic model and dynamics process of ore magma of cryptoexplosive breccia type in Dongji gold (silver) deposit, Zhenghe, Fujian

ZHU Yulin, MAO Guangwu, YAN Xieping

Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Fuzhou, 350007

Objectives: This research described the geological characteristics of the Zhenghe Dongji gold (silver) deposit, established a mineralization model of the deposit, demonstrated the mechanical process of the material transport and movement of the deposit, and explored the source of ore formation.

Methods: The mine has undergone systematic exploration and mining. The ore body from the surface at 580m ~620m to -200m underground was thoroughly exposed by drilling and exploration. Using conventional and reliable geological argumentation methods, the first-hand information has been comprehensively collected. This study also equipped with macro and micro rock and mineral identification and partial electronic probe analysis for comprehensive discussion.

Results: From top to bottom, Breccia pipe of the ore deposit can be divided into 5 facies belts: fissure facies belt, shattered facies belt, cryptoexplosive facies, upper channel facies and lower channel facies. Based on a series

of phenomena such as the structural characteristics of the ore, the contact relationship of the ore body intrusive surrounding rock, the characteristics of the breccia, and the composition of the cement, the deposit is the origin of the ore magma. The silicon-rich and iron-rich magma originated from the separation and differentiation of acidic magma in the deep crust—mantle transition zone. The former (silicon-rich magma) invaded upwards to form large-scale volcanic eruptions and sub-volcanic intrusion, while the latter (iron-rich magma) remained in the “source” and captured the sulfide droplets. The iron-rich magma then accumulated and formed a mixed ore magma. The physical properties and the mechanical characteristics of transport and movement indicate that under the external driving force, the ore magma invaded upwards along the quartz porphyry “magma thermal field channel”. Accumulation, concealed explosion, positioning and mineralization were undergone at 2.0 ~ 2.5 km below the paleo-surface, under the quartz porphyry silicon cap barrier.

Conclusions: The Zhenghe Dongji gold (silver) mine is a ore magma cryptoexplosive breccia type deposit. Quartz porphyry is ore-hosting wall rock, which has a close temporal and spatial relationship with the deposit but has nothing to do with its genesis. Deep drilling confirmed that the tail of the cryptoexplosive breccia tube converged in the quartz porphyry followed by the termination of mineralization. The “ore magma cryptoexplosion” is a novel type of Cryptoexplosive breccia type gold deposit and has not been published elsewhere. The discovery of this type provide a real-life example of the theory of intermediate—acid magmatic melting separation and mineralization, and is of great significance to the prospecting of the same type of gold deposit in the Mesozoic continental volcanic rock area in the south-eastern coast of China.

Keywords: Dongji gold mine; ore magma; cryptoexplosion; breccia cylinder; dynamic process

Acknowledgements : The above the Level 0 m is the collective prospecting achievements of Fuzhou Dongxin Mining Technology Company. This paper quotes the verification result of prospecting below the Level 0m by Shandong gold joint-stock company Zhenghe Yuanxin mining company. In-depth verification work carried out a useful discussion to improve the level of research deposits, the author benefited a lot, in this very grateful

First author: ZHU Yulin, male, born in 1954, chief senior engineer, one formerly belonged to chief engineer in the No. 2 Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, mainly engaged to gold ore explore and mining; Email: zhuyulin7140@163.com

Manuscript received on: 2020-07-18; Accepted on: 2020-10-23; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.01.008