

闽中东部地区金矿成矿规律综述与找矿方向研究探讨

钱 飞, 于海晶, 蒙 权, 冯建燕

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年10月7日; 录用日期: 2025年11月6日; 发布日期: 2025年11月14日

摘 要

本文是在前人工作的基础上系统阐述了闽中东部地区金矿的成矿规律, 并探讨了具体的找矿方向。该区域位于环太平洋成矿带西缘, 是晚中生代火山-岩浆弧的核心区域, 其独特的“棋盘格”式构造格架为金矿成矿提供了优越的条件。区内金矿化主要形成于加里东期和燕山期两个重要成矿期, 可划分为三大成因类型: 造山型金矿(与剪切带/脆韧性剪切带相关)、浅成低温热液型金矿和岩浆热液型金矿, 其中造山型金矿常伴有显著的构造蚀变。金矿成矿的控矿因素主要包括: NE向深大断裂与NW向断裂交汇形成的构造格架、环形火山机构、元古代地层和中生代火山岩系作为主要容矿围岩和金物质来源, 以及燕山期花岗质岩浆活动提供的热源和流体改造。成矿流体为岩浆热液、变质流体和大气降水的多源混合, 金主要以氯络合物和硫氢络合物形式迁移, 流体混合、水岩反应和沸腾是金沉淀的关键机制。围岩蚀变以硅化、绢英岩化、粘土化和青磐岩化为主, 形成同心环状分带, 强硅化带与金品位呈正相关。主要找矿标志包括: Au-As-Sb-Hg(浅成低温热液型)地球化学异常、岩层低阻电性异常、重力梯度带、遥感识别的蚀变带以及特定的岩石结构构造。重点找矿区域有德化火山盆地、尤溪裂谷带、永泰构造转换带和仙游基底隆起区, 这些区域均具备显著的成矿潜力。

关键词

金矿, 成矿规律, 闽中东部, 找矿方向, 中生代

A Review of Gold Mineralization Patterns and Discussion on Prospecting Directions in the Eastern Central Fujian Region

Fei Qian, Haijing Yu, Quan Meng, Jianyan Feng

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

文章引用: 钱飞, 于海晶, 蒙权, 冯建燕. 闽中东部地区金矿成矿规律综述与找矿方向研究探讨[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(11): 1539-1553. DOI: 10.12677/ag.2025.1511143

Abstract

Based on previous studies, this paper systematically elaborates the gold mineralization patterns in the eastern central Fujian region and discusses specific prospecting directions. The region is located on the western margin of the Circum-Pacific metallogenic belt and represents the core area of the Late Mesozoic volcanic-magmatic arc, where the distinctive “chessboard-like” structural framework provides favorable conditions for gold mineralization. Gold mineralization in the area was primarily formed during two major metallogenic epochs: the Caledonian and Yanshanian periods, and can be classified into three genetic types: orogenic gold deposits (associated with shear zones/brittle-ductile shear zones), epithermal gold deposits, and magmatic-hydrothermal gold deposits, with orogenic gold deposits commonly accompanied by significant structural alteration. The ore-controlling factors for gold mineralization mainly include: the structural framework formed by the intersection of NE-trending deep-seated faults and NW-trending faults, ring-shaped volcanic structures, Proterozoic strata and Mesozoic volcanic rock series serving as the principal ore-hosting wall rocks and sources of gold material, as well as the heat source and fluid modification provided by Yanshanian granitic magmatic activity. The ore-forming fluids represent multi-source mixing of magmatic hydrothermal fluids, metamorphic fluids, and meteoric water, with gold primarily transported as chloride and bisulfide complexes. Fluid mixing, water-rock interaction, and boiling constitute the key mechanisms for gold precipitation. Wall-rock alteration is dominated by silicification, phyllic alteration, argillic alteration, and propylitic alteration, forming concentric zonal patterns, with intense silicification zones showing positive correlation with gold grades. Primary prospecting indicators include: Au-As-Sb-Hg (epithermal type) geochemical anomalies, low-resistivity electrical anomalies in rock formations, gravity gradient zones, remotely sensed alteration zones, and specific rock structural features. Priority prospecting areas include the Dehua volcanic basin, Youxi rift zone, Yongtai structural transition zone, and Xianyou basement uplift area, all of which demonstrate significant metallogenic potential.

Keywords

Gold Deposit, Mineralization Pattern, The Eastern Part of Central Fujian, Prospecting Direction, Mesozoic

Copyright © 2025 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. 研究背景与意义

闽中东部位于环太平洋成矿带西缘，地处欧亚板块与太平洋板块俯冲带前缘，是晚中生代火山 - 岩浆弧的核心区域。区内发育长乐 - 南澳断裂带、福安 - 南靖断裂带和政和 - 大埔断裂带等 NE 向深大断裂，与 NW 向断裂系统交汇，构成“棋盘格”式控矿构造格架，为金矿成矿提供了优越的构造条件。区内地质建造复杂多样，发育前寒武系马面山群变质岩系、侏罗纪 - 白垩纪的南园组火山岩系及燕山期花岗岩等多套含金地质体。已发现多种类型的金矿，主要包括邱村、东洋、太华山、东华等浅成低温热液型金矿[1]-[7]，双旗山、尤溪肖坂、西洋坂、戴云山、仙洋、雷潭、下尖等与剪切带/脆韧性剪切带相关的造山型金矿[8]-[15]和扶枫林、石头坂等岩浆热液型金矿床[16][17]。揭示了区内成矿类型的多样性和成矿

条件的复杂性,部分矿区存在多种类型金矿,暗示经历了多期次成矿作用。区内深部金矿资源潜力巨大。在当前国际金价持续上涨和我国金矿对外依存度较高的背景下,闽中东部作为东南沿海重要的金矿集中区,其深部找矿对提高国家黄金资源储量有一定的意义。

本文系统梳理了区域成矿地质背景、类型及时空分布,对比浅成低温热液型(低硫化型为主),造山型/构造蚀变岩型/变质热液型(剪切带、脆韧性剪切带相关),岩浆热液型(中低温热液主导)金矿床的成因和特征,厘定成矿时代、深度及流体来源等争议问题。此外总结和探讨了闽中东部地区金矿找矿标志和找矿方法,对闽中东部金矿勘查具有一定的意义。

2. 区域地质背景

2.1. 大地构造位置和构造格架

福建德化、尤溪、永泰和仙游四县位于欧亚板块东南缘,处于环太平洋构造域与特提斯构造域的复合部位,具有独特的大地构造位置(图 1)。

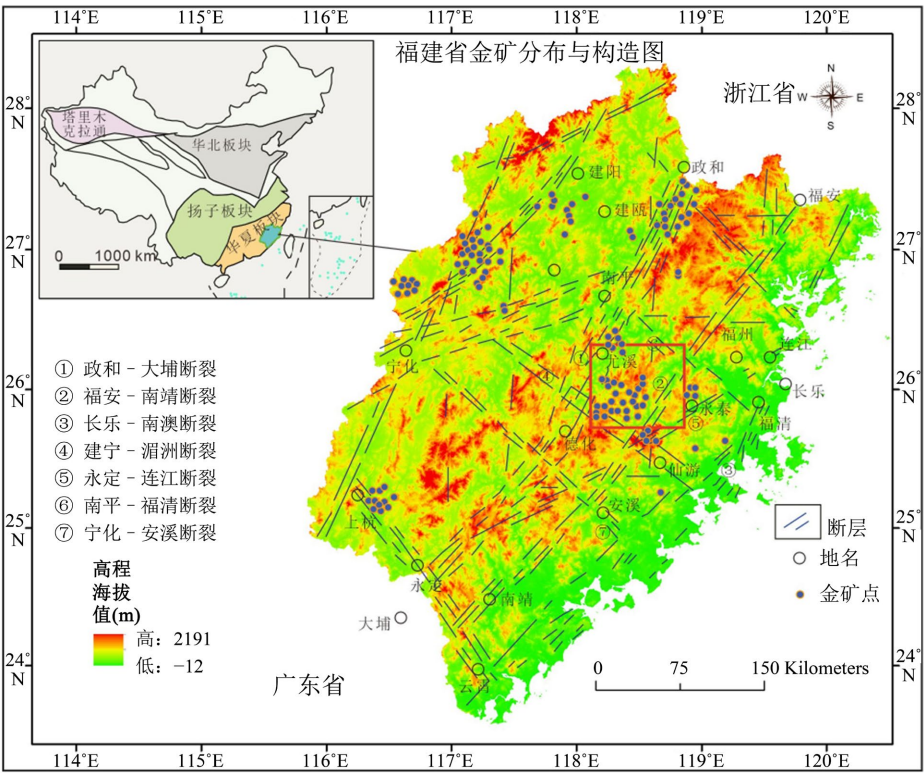


Figure 1. Schematic diagram of fault structures and topography in Fujian Province (Base map based on [18])
图 1. 福建省断裂构造和地形示意图(底图根据[18])

一级构造单元:四县均属华南地块(华夏地块)东北部,位于闽东火山断拗带的核心区域,是晚中生代火山弧的重要组成部分。二级构造单元:德化位于浙闽粤火山断陷带,为火山弧核部的喷发中心;尤溪处于闽中东部拗陷带的北缘,属弧后裂谷盆地环境;永泰位于闽东火山断拗带中部,为火山弧前缘斜坡;仙游处于闽东火山断拗带南段,属火山弧基底隆起区。构造控制:长乐 - 南澳断裂带、政和 - 大埔断裂带,福安 - 南靖断裂带等 NE 向深大断裂与 NW 向建宁 - 湄洲断裂和南平 - 福清断裂等构成“棋盘格”式构造格架,控制了区域尺度构造演化和金矿成矿作用。研究区附近的区域构造格架由七大主要断裂带

构成(图 1)。长乐 - 南澳断裂带走向 NE45°, 长度超过 400 km, 为左旋走滑兼正断层性质, 是深部流体通道, 切割深度超过 20 km; 政和 - 大埔断裂带走向 NNE30°, 长度超过 300 km, 表现为逆冲 - 伸展转换特征, 控制火山弧与裂谷分界; 建宁 - 湄洲断裂带走向 NW320°, 长度 150 km, 具张扭状性质, 为共轭断裂扩容区容矿。次级构造包括环状断裂(直径 1~3 km)和放射状断裂, 分别控制火山喷发中心和热液活动通道。

2.2. 区域地层系统

福建德化、尤溪、永泰和仙游四县地层系统复杂, 构成了重要的金矿地质框架(图 2)。基底组成以前寒武系马面山群大岭组的变粒岩、斜长角闪岩等变质岩系为成矿提供重要物质来源; 侏罗 - 白垩系南园组火山岩系构成主要容矿围岩。古生代地层四县均零星分布, 主要为志留纪花岗岩, 二叠系沉积岩和二叠纪花岗岩。中生代地层是区域主要含金层系。侏罗系南园组火山岩广泛发育, 包括流纹岩、凝灰岩和火山角砾岩, 为重要容矿层位[19]。四县中德化南园组最为发育, 尤溪次之。新生代地层古近系佛县组砂砾岩(可能存在砂金矿)分布于永泰、德化, 并被第四系松散堆积物广泛覆盖。

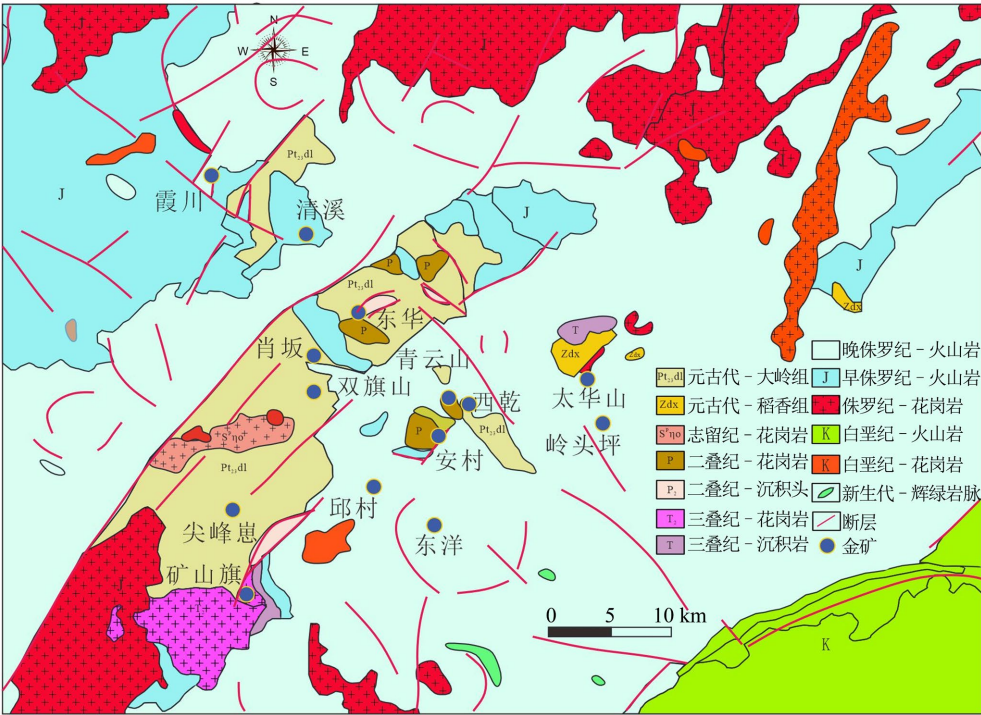


Figure 2. Regional geological map of gold deposits in parts of eastern central Fujian (Based on [20])
图 2. 闽中东部部分地区金矿区域地质图(根据[20])

3. 闽中东部地区金矿地质特征

3.1. 矿床时空分布规律

3.1.1. 成矿时代分布规律

闽中东部金矿成矿时代约束对理解区域成矿规律和指导金矿找矿预测带来重要意义, 前人已经通过多种金矿伴生矿物定年测定的方法建立了较为完整的成矿年代学框架[1] [6] [8] [21]-[25]。表 1 总结了闽东地区部分金矿成矿时代的前人研究。

闽中东部金矿成矿作用主要发生在加里东期和燕山期，可划分为两期主要金矿成矿阶段。区内金矿成矿期次主要集中于燕山期(约 104~182 Ma)，少量形成于加里东期(如双旗山金矿， 436.8 ± 7.6 Ma)。燕山期成矿阶段(104~182 Ma)包括：低温热液型金矿(154~164 Ma)，主要有东华、邱村、东洋等矿床[21][23]；岩浆热液型金矿(182 Ma)，以肖坂金矿为代表[24]；青云山铜金矿(158.1 ± 9.3 Ma) [25]；以及邱村矿区的晚期热液叠加作用(104 ± 2.6 Ma) [22]。加里东期成矿阶段(436.8 ± 7.6 Ma)主要形成双旗山造山型金矿，其属于武夷 - 云开陆内造山运动晚期的产物[8]。总体而言，区域金矿成矿以燕山期浅成低温热液型金矿和岩浆热液型金矿为主，局部保留有加里东期造山型金矿化记录。

前人研究中关于同一金矿成矿时代为什么会有争议，结合区内多期次成矿规律来看，可能是同一矿床不同位置成矿时代不同。前人采样的位置不同，导致得出不同时代的结论。所以在在一个矿床的研究中需要在不同位置，不同深度采集大量的样品进行系统的研究才能避免忽略其它成矿期次的问题发生。

Table 1. Types and metallogenic ages of some gold deposits in eastern central Fujian
表 1. 闽中东部部分金矿类型和成矿年代

采样矿区	矿床类型	测试对象和定年方法	成矿年龄	成矿时代	资料来源
德化县东华金矿	低温热液型金矿	绿泥石 U-Pb	154~153 Ma	燕山期	[21]
德化县东华金矿	低温热液型金矿	黄铁矿 Rb/Sr	153.7 ± 2.4 Ma	燕山期	[1]
德化县邱村金矿	低硫化型浅成低温热液金矿	热液磷灰石 U-Pb	160.5 ± 6.0 Ma	燕山期	[6]
德化县邱村金矿	低硫型浅成低温热液矿床	黄铁矿 Rb/Sr	104 ± 2.6 Ma	燕山期	[22]
德化县东洋金矿	浅成低温热液金矿床	黄铁矿 Rb/Sr	164.2 ± 9.9 Ma	燕山期	[23]
德化县双旗山金矿	造山型金矿	热液磷灰石 U-Pb	436.8 ± 7.6 Ma	加里东期 晚武夷 - 云开陆内 造山运动时期	[8]
尤溪县肖坂金矿	岩浆热液型金矿	蚀变矿物进行 Rb/Sr	182 Ma	燕山期	[24]
德化 - 尤溪青云山铜金矿	次火山低温热液矿床	黄铁矿的 Re-Os 同位素	158.1 ± 9.3 Ma	燕山期	[25]

3.1.2. 矿床空间分布规律

闽中东部金矿床空间分布受“断裂 - 岩浆 - 地层 - 流体”四元耦合控制，呈现带状聚集、垂向分异、多层结构的规律性特征。

金矿床主要沿 NE 向和 NW 向断裂带分布(表 2)，呈明显的带状聚集特征。政和 - 大埔断裂东侧带宽 15~25 km，以浅成低温热液型为主，占总数 70%，典型矿床包括德化东华金矿和邱村金矿等[1][6][7][22]。

不同地层单元控矿作用不同，南园组流纹质角砾岩为浅成低温热液主容矿层；长林组中砂砾岩层间滑脱带控矿；马面山群斜长角闪岩韧性剪切带为造山型金矿赋存空间。

区内环形火山机构控矿表现明显。以德化东洋金矿火山机构为例，大部分矿化体赋存于流纹斑岩与南园组火山岩中，火山机构形成的隐爆角砾岩型矿化中金品位通常也相对较高[7]。

区内四县不同高程区间矿床类型存在明显差异。上部主要为石英脉型，矿体呈陡倾脉状，中部主要为浅成低温热液型，矿体呈网脉状 - 角砾岩筒状，厚 10~50 m，成矿深度小于 2 km，下部以构造蚀变岩型为主，矿体呈层状 - 透镜状。

Table 2. Types of gold deposits and ore-controlling tectonic types in the eastern central Fujian area
表 2. 闽中东部地区金矿类型和控矿构造类型

所属市/县和矿床名称	矿床类型/成矿模式	控矿构造	资料来源
德化县东华金矿	低温热液型金矿	北东向断裂控制	[1]
德化东华金矿	低温热液型金矿	北东向断裂控制	[21]
德化县邱村金矿	低硫化型浅成热液金矿	北东向断裂	[6] [22] [26]
德化邱村金矿	低硫化型低温热液型金矿	北东向断裂和近东西向断裂控制	[7] [27] [28]
德化县东洋金矿	浅成低温热液金矿床	NE 和 NW、EW 次一级断裂构造	[23] [29]
德化县东洋金矿	低硫化型浅成低温热液金矿床	火山机构断裂控制	[4]
德化县东洋金矿	低硫化型浅成热液金矿床	北西 - 南东(NW-SE)向展布的火山构造	[2] [3]
德化县东洋金矿	浅成热液低硫化型金矿床	NE 向断裂和近 NW 向断裂	[30]
德化县东洋金矿	为火山 - 次火山热液型金矿床	断裂构造发育, 主要有北东、北西向	[31]
福建东洋大冬坑金矿	低硫化型浅成低温热液型金矿床	WN 向压扭性断裂体系	[32]
德化县仙洋矿区	受脆韧性剪切带控制的中 - 低温热液型金矿床	受脆韧性剪切带控矿	[13]
德化县东洋金矿	火山 - 次火山热液型金矿床	北东、北西及南北向 3 组断裂构造	[33]
德化县东洋金矿	浅成低温热液型金矿床	NE 向断裂和近 NW 向断裂	[34]
德化县双旗山金矿	造山型金矿	北东向和北西向断裂	[8]
德化县双旗山金矿	热液叠加蚀变型矿床	褶皱构造和 NE50°~60°方向的断裂构造	[35]
德化县双旗山金矿	中低温岩浆热液蚀变岩型金矿床	内韧性剪切带控制	[9]
德化县肖坂 - 双旗山金矿	陆相火山岩型金矿和变质碎屑岩中热液型金矿	产于韧性剪切构造带中	[36]
福建双旗山金矿	受剪切带控制的热液叠加蚀变型金矿床	褶皱构造和断裂构造	[37]
德化双旗山金矿	受剪切带控制的热液叠加蚀变型金矿床	NE 向断裂和近 NW 向断裂和褶皱构造	[38]
德化县扶枫林金矿	中低温热液型金矿	受北东向断裂构造控制	[16]
德化县安村雷潭金矿	受断裂构造控制的蚀变岩型金矿	北西向构造断裂带控制	[14]
德化雷潭金矿	受断裂构造控制的蚀变岩型金矿	受 NE、NW、近 EW 向断裂带控制	[39]
德化县淳湖金矿	晚侏罗世火山作用有关的构造蚀变岩型金矿	北西向断裂的次级断裂控制	[40]
德化青山铜金矿	次火山中低温热液蚀变型铜金矿	断裂构造有近南北向	[41]
德化县青山铜金矿	次火山低温热液矿床	矿体受断裂及构造蚀变带控制	[42]
德化 - 尤溪青山铜金矿	次火山低温热液矿床	受 NE、NW、近 EW 向断裂带控制	[25]
德化西洋坂金矿	变质热液型	北西向和北东向 2 组断裂	[11]
德化县肖坂金矿	岩浆热液型金矿	受低角度断裂(拆沉)构造控制	[24]
尤溪金矿(肖坂式)	脆韧性剪切带型金矿床	脆韧性断裂构造控制	[43]
尤溪肖坂东一带金矿	绿岩带韧性剪切带型金矿床	脆韧性断裂构造控制	[10] [44]-[46]

续表

尤溪官田金矿	破碎带蚀变岩型(沉积变质岩浆热液富集矿床)	北东断裂和褶皱构造	[47]
福建德化石头坂金矿	岩浆期后中低温热液矿床	NE 向、NW 向两组断裂构造	[17]
德化 - 尤溪石头坂金矿床	低硫化型浅成低温热液金矿床	受北西(NW)向断裂控制	[48]
德化西乾铜金矿	次火山(英安玢岩)热液型和破碎蚀变岩型	北北西向断裂构造控制	[49]
德化县西墘矿区铜金矿	次火山(即英安玢岩)热液型和破碎蚀变岩型	北北西向断裂控制明显	[50]
福建戴云山中段变质岩中热液脉型金矿	变质岩中热液脉型金矿	主要为 NE 向、NW 向褶皱的叠加	[12]
仙游县山坪洋金矿	中低温火山热液型金矿床	区域断裂与火山机构环状断裂	[51]
仙游县牛头山金矿	为火山热液充填交代型	北东断裂及火山构造最为发育	[52]
永泰县金林溪金矿区	构造热液充填为主的中低温热液蚀变型金矿床	受区域北东向和火山断裂控制	[53]
闽中太华山金矿区	浅成低温热液型金银矿	NW (或 NWW)向断裂控矿构造	[5]
德化县下尖铜、金矿	构造蚀变岩型铜、金矿	北西向断裂控制	[15]

3.2. 不同类型金矿的矿体和矿物组合特征

区内金矿床根据成矿环境和成因机制可分为浅成低温热液型(低硫化型为主)、造山型/构造蚀变岩型(剪切带相关)和岩浆热液型三大类,各类矿床在矿体形态、矿石矿物组合及脉石矿物特征上具有显著差异。

浅成低温热液型金矿主要形成于火山 - 次火山热液环境,成矿温度较低(<300℃),矿体多呈脉状、网脉状或浸染状产出。矿石矿物以黄铁矿、自然金、银金矿为主,伴生少量毒砂、白铁矿、黄铜矿、方铅矿及碲化物;脉石矿物主要为石英、绢云母、伊利石、玉髓及方解石,矿石构造以细脉状、网脉状和浸染状为典型特征[1]-[7]。

造山型/构造蚀变岩型金矿通常受控于韧性剪切带或断裂构造,与变质热液或构造热液叠加作用相关。矿体多呈蚀变岩型或石英脉型,矿石矿物组合以黄铁矿、自然金、磁铁矿、褐铁矿为主,含少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿及辉钼矿;脉石矿物以石英、斜长石、绿泥石、绢云母及碳酸盐矿物(方解石、白云石)为主,矿石构造常见碎裂状、蚀变岩型及黄铁矿化石英脉型[8]-[15]。

岩浆热液型金矿与中酸性岩浆热液活动密切相关,成矿温度较高(>300℃),矿体多呈网脉状或块状分布。矿石矿物以黄铁矿、黄铜矿、自然金、辉钼矿为主,伴生方铅矿、闪锌矿、斑铜矿及黝铜矿;脉石矿物主要为石英、长石、绢云母、绿泥石及重晶石,矿石构造以浸染状、网脉状及块状为主,常与铜矿化共生[16][17]。综上,区内不同类型金矿的矿物组合及构造特征反映了其特定的成矿环境和地质背景,为矿床成因研究和找矿勘探提供了重要依据。矿产勘查过程中需要留意遇到特殊的矿物组合。

4. 闽中东部地区金矿成矿规律总结

4.1. 控矿因素分析

4.1.1. 构造控矿作用

闽中东部金矿的构造控矿表现为多级次断裂系统的复合控制。区域性 NE 向断裂带(如政和 - 大埔断裂带、福安 - 南靖断裂带和长乐 - 南澳断裂带)构成一级控矿构造,控制着金矿集中分布区域。这些深大

断裂带不仅是成矿流体的主要运移通道,更是岩浆侵位的控制因素。

次级断裂系统的发育程度直接影响矿体的规模和品位。典型如德化邱村和肖坂金矿,其矿体主要受 NW 向和近 EW 向断裂控制,两组断裂的交汇部位形成了高品位矿体富集中心[24] [27]。闽中东部的金矿床多分布于断裂交汇部位或断裂转折端,这些部位因应力释放形成的扩容空间为成矿流体提供了理想的沉淀场所。

环形断裂系统在火山机构周边的发育,如德化东洋金矿地区的环形断裂,控制着浅成低温热液型金矿的分布(图 2)。这类断裂系统的渗透率通常比区域断裂高,有利于低温成矿流体的循环和金的沉淀。

区内矿床主要受 NE 向政和 - 大埔和福安 - 南靖断裂系统和火山机构环状断裂控制。德化双旗山金矿受火山环状构造和 NW 向建宁 - 湄洲断裂交汇控制[37]。本文综合考虑后认为构造控矿表现为断裂交汇区成矿概率显著提高。

4.1.2. 地层相关控矿作用

闽中东部金矿的地层岩性控矿具有明显的选择性。中生代火山岩系和元古代马面山群大岭组是最重要的赋矿岩石[31] [35],这些岩石既提供了金的物质来源,又因其脆性特征易于形成裂隙系统,为含金成矿流体提供便利的运移通道。此外德化地区存在多个二叠纪花岗岩岩体,周围也存在多个金矿,虽然金矿成矿期不是这个时段,但是印支运动形成了许多裂隙,有利于金矿成矿。岩性界面控矿现象在闽中东部较为普遍。如火山岩与元古代大岭组变质岩的接触带、不同期次火山岩的界面等,这些部位因物理化学性质差异形成的应力集中和渗透率差异,成为金矿化的有利部位。

4.1.3. 岩浆岩控矿作用

闽中东部金矿成矿与加里东期和燕山期岩浆和构造活动密切相关,区内岩浆岩以燕山期花岗质岩类为主,具有明显的成矿专属性特征。主要岩类包括花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗斑岩和晶洞花岗岩等。

含矿岩体多具斑状结构和块状构造,发育黄铁矿化、硅化等蚀变组合。火山机构中心浅侵位岩体(<3 km)形成浅成低温热液型矿化[30],断裂交汇区中等深度岩体(3~5 km)形成构造蚀变岩型矿化。闽中东部金矿与加里东期和燕山期岩浆活动密切相关,主要表现为多期次岩浆侵入对成矿的控制作用[9]。早期(435~400 Ma)花岗闪长和二长花岗岩侵入活化了古老变质沉积岩中金元素[8]。中期(182~153 Ma)的花岗闪长岩侵入时代是区内金矿主要成矿期,提供了热源和成矿物质[1] [24] [54],晚期(145~102 Ma)的花岗斑岩、石英斑岩侵入则直接参与了金矿改造的过程[22]。这类岩体通常具有较高的氧逸度,有利于金以氯络合物形式迁移。

岩浆热液系统的演化控制着不同类型金矿的形成。高温阶段(400℃~600℃)形成斑岩型金铜矿化,中温阶段(250℃~400℃)形成岩浆热液型金矿,低温阶段(150℃~250℃)形成浅成低温热液型金矿。

4.1.4. 变质作用控矿:深部成矿的推动力

虽然闽中东部金矿以浅成低温热液成矿为主,但区域变质作用对成矿仍有重要影响。中低级区域变质作用(绿片岩相 - 低角闪岩相)促进了围岩中金的活化和重新分配,形成了变质热液型金矿。

热接触变质作用在岩体周边形成的角岩化带,常常是金矿化的有利部位。接触变质过程中的脱水反应释放含金流体,同时形成的热液角砾岩为后期矿化提供了有利空间。

动力变质作用沿断裂带发育的糜棱岩、碎裂岩等,因其特殊的结构构造为含金成矿流体提供了便利的运移和良好的沉淀空间。

4.1.5. 成矿流体系统

流体物理化学条件的演化控制着金的迁移形式和沉淀机制。早期高温高盐度流体中,金主要以氯络合物 AuCl_2 形式迁移;晚期低温低盐度流体中,金以硫氢络合物 $\text{Au}(\text{HS})_2$ 形式存在。流体的 pH 值、温

度、压力变化是触发金沉淀的主要因素[55]。

流体通道系统的发育程度决定了矿体的形态和规模。闽中东部金矿普遍发育断裂-孔隙双重介质系统,断裂系统提供主要的流体运移通道,而次生孔隙(如角砾岩、蚀变岩中的孔洞)则为金的沉淀提供空间。闽中东部含金成矿流体的迁移受多级次断裂系统控制。区域性 NE 向断裂带(如政和-大埔断裂)构成主要的流体运移通道,为深部流体的快速上升提供了条件。次级断裂系统(NW 向、近 EW 向)则控制流体中含金物质的沉淀。

闽中东部金矿成矿流体呈现典型的多源混合特征,主要包括岩浆热液、变质流体和大气降水三大来源。氢氧同位素研究表明,早期成矿流体以岩浆水为主,晚期则有大量大气降水参与混合[20] [22] [25]。

以德化县邱村金矿为例,其成矿流体演化过程清晰显示了从岩浆主导向大气水主导的转变。这种流体混合过程不仅稀释了成矿流体,更重要的是引起了温度、pH 值和氧逸度的急剧变化,成为触发金沉淀的关键机制[6]。闽中东部含金成矿流体的物理和化学条件具有明显的阶段性演化特征。流体包裹体研究显示,温度从早期的 328℃~302℃逐步降低至 238℃~170℃(浅成低温阶段),压力从 105~160 MPa 降至 11.07~17.52 MPa,盐度从低到高再到低的转变[30]。随着温度降低和流体稀释,金的迁移形式逐渐转变为硫氢络合物 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 。后期在酸性环境下,硫化物沉淀导致流体中 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 络合物失稳而沉淀下来[55]。

热驱动对流循环是流体运移的主要动力机制。加里东和燕山期岩浆侵入提供了持续的热源,驱动大气降水下渗、加热并沿断裂系统上升,形成了大规模的热液对流系统,搬运形成金矿所需的成矿物质。

断裂泵吸作用在成矿过程中发挥重要作用[56]。构造应力的周期性释放导致断裂的张开-闭合循环,形成“地震阀”效应,促使深部含金流体的脉动式注入。这一机制很好地解释了闽中东部金矿中普遍发育的多期次石英脉和韵律性矿化现象。

4.2. 成矿过程与机制

闽中东部金矿的成矿物质主要来源于中生代火山-侵入岩系和古老基底岩石。区域内中酸性火山岩和古老基底岩石的金背景值 5.8~21 ppb 远高于地壳[46],为成矿提供了重要的物质基础。燕山期多期次岩浆活动是金活化的主要触发因素,岩浆侵入产生的高温(>700℃)使围岩中的金从硫化物晶格中释放出来。

源区活化机制主要包括热变质作用和流体淋滤过程。当岩浆侵入体加热围岩至 450℃~600℃时,原生黄铁矿发生分解反应,释放出载金硫化物中的金元素,岩浆期后富 Cl^- 热液对围岩进行强烈淋滤,金元素从围岩中被淋滤出并进入流体中[4]。

闽中东部金矿成矿流体中,金主要以 AuCl_2^- 和 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 络合物形式迁移。早期高温高盐度阶段,金以氯络合物为主;中晚期中低温阶段(200℃~350℃),硫氢络合物成为主导形式[8]。流体运移动力系统受岩浆热驱动和构造应力双重控制。岩浆房提供的热源驱动大气降水下渗-加热-上升的对流循环。NE 向深大断裂带构成主要的流体运移通道,同时,区域构造应力引起的次级断裂泵吸作用形成脉动式流体注入,含金热液被吸入其中。

闽中东部金矿的金沉淀主要受流体混合、水岩反应和相分离三大机制控制。流体混合沉淀是最重要的机制,当高温高盐度岩浆热液与低温低盐度大气降水混合时,温度从骤降,pH 值从酸性转为中性,导致金络合物快速分解,形成金沉淀[48]。

水岩反应过程中,含金成矿流体与其围岩的相互作用改变了流体的 pH 值和氧逸度。特别是当酸性成矿流体与碳酸盐岩或基性火山岩反应时,pH 值的升高(从 4~5 升至 6~7)导致 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 络合物的丧失稳定性,促使金的快速沉淀。

相分离(沸腾)作用在浅成低温金矿化中尤为重要[57]。当含金流体从深部上升至浅部低压环境时,发生剧烈沸腾, CO_2 等挥发分的大量逸出导致流体 pH 值升高和金络合物分解。

矿床定位与保存条件对金矿规模有巨大影响。闽中东部金矿的空间定位主要受构造控制，金矿床主要分布在断裂带及其影响范围内。断裂交汇部位、转折端和分支复合部位是矿体的主要赋存空间。岩性控制表现为金矿体优先赋存于中酸性火山岩、花岗斑岩等脆性岩石中，这些岩石易于形成裂隙系统，为成矿流体提供沉淀空间。成矿后保存受构造抬升和剥蚀作用影响。闽中东部地区中生代以来的构造抬升幅度适中，既使深部矿体得以暴露，又避免了过度剥蚀。浅成低温热液型金矿因形成深度较浅(<2 km)，在适度剥蚀条件下得以良好保存。部分矿床还经历了多期热液叠加改造，如德化双旗山金矿的多期成矿作用，显著提升了矿体品位和规模[8] [37]。综上所述，闽中东部金矿成矿过程遵循“岩浆驱动活化→热液载运迁移→多机制协同沉淀→构造控制定位”的演化模式。

4.3. 成矿模式

闽中东部金矿大部分形成于燕山期环太平洋板块俯冲背景，以浅成低温热液型为主导模式，兼具造山型/构造蚀变岩型/变质热液型(剪切带、韧性剪切带相关)和岩浆热液型金矿成矿特征(图 3)。在加里东期岩浆活动活化古老变质岩中金元素，形成初始金矿，早燕山期浅成低温热液成矿表现为“岩浆驱动 - 大气水循环 - 浅部沸腾沉淀”过程。早燕山期中酸性岩浆(150℃~300℃)驱动大气降水深循环，形成低盐度(2%~10% NaCl)含金流体，流体沿 NE 向断裂上升至<2 km 浅部时压力骤降，导致沸腾作用引发 CO₂ 逸出、pH 值升高，促使 Au(HS)₂⁻络合物分解沉淀。到了燕山晚期，太平洋板块后撤，软流圈上涌，形成大规模岩浆事件。岩浆活动再次改造了已经形成的金矿。这说明有的金矿是多阶段成矿，这解释了为什么区内金矿有多个成矿时代。

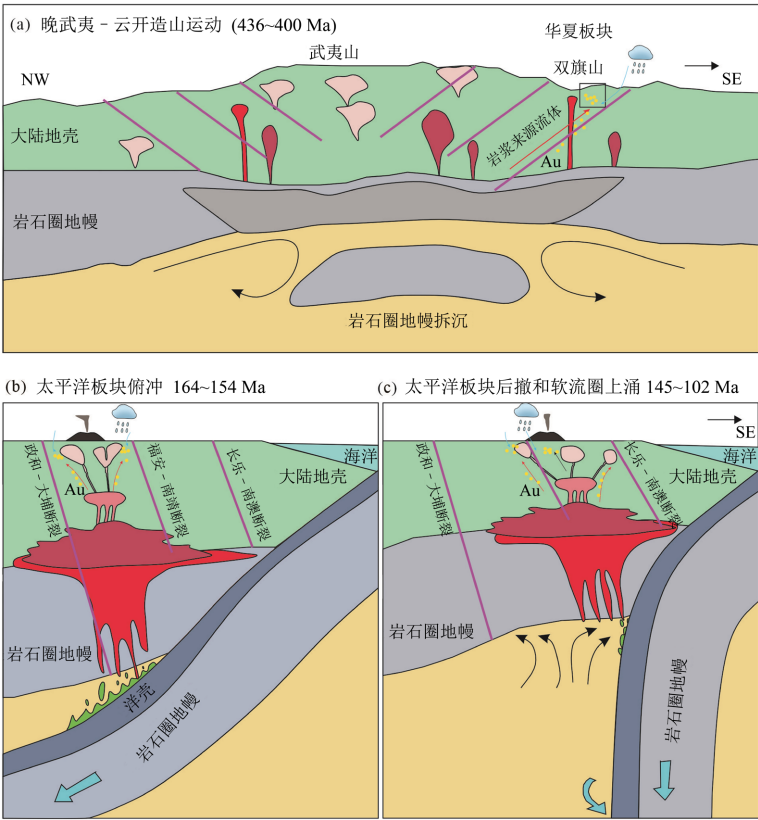


Figure 3. Diagram of metallogenic setting and metallogenic model of gold deposits in eastern central Fujian ((a) modified from [8]; (b) and (c) modified from [58])

图 3. 闽中东部地区金矿成矿背景和成矿模式图((a)修改自[8], (b)和(c)修改自[58])

5. 找矿标志与预测探讨

5.1. 矿物和岩石找矿标志

闽中东部金矿围岩蚀变作为浅成低温热液活动的直接产物, 展现出类型多样、分带清晰、与矿化密切相关的关键找矿标志。区内发育以硅化、绢英岩化、粘土化和青磐岩化为主的蚀变组合, 其空间配置构成关键找矿标志。硅化带(矿物组合石英 + 玉髓 + 蛋白石)形成于所有矿化类型的核心部位, 是金的主要载体, 金品位与硅化强度呈显著正相关; 向内过渡至绢英岩化带, 发育于 200~350℃中温环境, 常见于斑岩型与造山型金矿近矿位置, 形成浸染状矿化; 外围依次发育粘土化带(高岭石/蒙脱石/伊利石, <250℃低温酸性环境)与青磐岩化带(绿泥石 + 绿帘石 + 钠长石, 250℃~400℃), 前者多位于矿体顶板但可指示深部矿体, 后者则标志蚀变系统边界且基本无经济矿化。

绢云母化 - 高岭石化组合指示中低温热液活动, 是浅成低温热液型金矿的典型标志。绢云母的结晶度和化学成分可指示成矿温度: 高结晶度绢云母指示温度 250℃~350℃, 低结晶度绢云母指示温度 150℃~250℃。明矾石化常与高硫化浅成低温型金矿伴生, 明矾石的 SO_3 含量 >20%时指示强酸性流体活动。

黄铁矿化是最重要的载金矿物标志。黄铁矿的形态、成分和共生组合可指示成矿类型: ① 立方体黄铁矿多为早期低温产物; ② 五角十二面体黄铁矿指示中高温成矿; ③ 胶状黄铁矿常富含纳米金。黄铁矿中 As 含量 >1000 ppm、Co/Ni 比值 >1 时, 通常指示热液成因和较高的载金潜力。

区内矿物组合通常具有成矿类型指示意义。黄铁矿 + 石英 + 绢云母组合指示造山型或浅成低温型金矿; 黄铜矿 + 辉钼矿 + 磁铁矿组合指示斑岩型金铜矿; 雄黄 + 雌黄 + 辰砂组合指示高硫化浅成低温型金矿[59]。

脉石矿物标志同样重要。冰长石是低硫化浅成低温型金矿的特征矿物; 明矾石 + 石英组合指示酸性硫酸盐蚀变; 方解石 + 石英脉常与中低温金矿化伴生。矿物的结晶习性也有指示意义: 粗晶石英脉多形成于较深部的中高温环境, 细晶 - 隐晶质石英多形成于浅部低温环境。

岩石蚀变程度是评价成矿潜力的重要指标。新鲜岩石中长石的绢云母化、石英化程度与金矿化强度呈正相关关系。当绢云母化指数(绢云母/(绢云母 + 长石)) > 0.4 时, 通常指示强烈的热液活动和较高的成矿潜力。蚀变矿物组合: 高岭石 + 明矾石组合指示酸性流体活动, 绢云母 + 石英组合反映中性流体环境; 地表铁帽中蜂窝状褐铁矿和残留石英是重要找矿标志, 硅帽中玉髓质石英岩指示浅成低温矿化中心。

岩石结构构造标志对成矿具有重要指示意义。角砾状构造发育的火山角砾岩和热液角砾岩是流体活动的直接证据, 可为成矿流体提供了理想的运移和沉淀空间。

5.2. 断裂和褶皱系统找矿标志

断裂交汇部位是重点找矿靶区, NE 向与 NW 向断裂的交汇处常形成 X 型或 Y 型构造结, 应力释放形成的扩容空间为成矿流体提供了沉淀场所。断裂带特征标志包括: 硅化石英脉发育, 脉宽 0.1~5 m, 延伸数百米至数千米; 构造角砾岩、糜棱岩等动力变质岩发育; 断层泥、断层角砾等断裂充填物中可见黄铁矿、方铅矿等硫化物矿化。倾角 60°~85°的高角度断裂最有利于成矿, 倾角 <45°的断裂多为不利构造。

NE 向长乐 - 南澳断裂与政和大埔断裂为导矿断裂, NW 向次级断裂为容矿断裂。伸展峰期与主成矿期高度耦合, 形成超过 80%的金资源量。优先靶区需满足断裂交汇处, 火山机构附近的条件, 重点关注政和 - 大埔断裂东侧、长乐 - 南澳断裂的西盘 20 km 带内的断裂交汇区深部第二成矿空间。

褶皱构造标志主要表现为背斜轴部和向斜转折端的虚脱空间。这些部位因应力集中易形成次级裂隙系统, 为成矿流体提供运移通道。

5.3. 地球化学找矿标志

地球化学要素是近矿指示的核心标志。Au-As-Sb 元素组合是浅成低温热液型金矿的典型标志, 土壤中 As, Sb 正异常时通常指示矿化头部[60]。Cu-Mo-Bi 组合指示深部斑岩系统, Mo > 10 ppm 的环状异常圈定岩体周边成矿有利部位。闽中东部金矿的地球化学找矿标志以 Au-Ag-Cu-Pb-Zn-As-Sb 元素组合异常为核心特征[49]。

汞气异常在覆盖层发育区表现突出, 汞气含量高的异常区与含金断裂破碎带或含金石英脉有关[61]。

原生晕分带规律明显, 从矿体向外依次为: Au-Ag 核心晕→Cu-Pb-Zn 近矿晕→As-Sb-Hg 前缘晕→W-Bi-Mo 尾部晕。这种分带性为判断剥蚀程度和预测深部矿体提供了重要依据。

土壤地球化学异常是闽中东部金矿勘探的重要标志。B 层土壤中 Au 含量 > 20 ppb、As 含量 > 50 ppm 时通常指示下伏矿化。水系沉积物异常有良好的指示作用, Au 含量 > 10 ppb 的异常流域内通常存在金矿化。结合 As、Sb 元素异常可为区域普查提供了有效手段。

5.4. 地球物理找矿标志

地球物理要素为深部隐伏矿体预测提供关键信息。磁异常表现为高磁背景上的局部低缓区, 指示隐伏花岗岩体或强蚀变带。其异常形态可直接显示了研究区内环形火山机构分布特征以及研究区内断裂构造展布特征, 通过磁测数据进行不同方向导数的计算可以显示不同方向断裂构造展布规律[34]。重力梯度带(梯度值 > 3 mGal/km)有效圈定基底断裂位置, 为构造控矿分析提供依据[62]。当前重力勘探与其他地球物理技术相结合, 主要应用于地球深部构造探测、区域构造格架及结晶基底研究、区域性深大断裂识别, 以及金属和非金属矿产成矿带的圈定等方面, 在地质条件适宜的情况下还可开展直接找矿勘查。大地电磁测深法电性异常是最直接的找矿标志, AMT/CSAMT 测深显示的低阻异常体通常对应矿化蚀变带[63]。地震反射中的反射模糊带指示热液角砾岩筒, 能为火山机构型金矿预测提供重要线索。地震波探测隐伏地层和构造断裂具有良好的效果。

5.5. 遥感找矿标志

遥感技术为快速圈定蚀变异常提供有效手段。短波红外光谱(SWIR)能有效识别粘土矿物蚀变。2200 nm 波段吸收深度 > 5%指示强烈的高岭石化或明矾石化, 热红外遥感通过发射率 > 0.85 识别硅化蚀变带, 为区内火山机构中硅化带的圈定提供了重要依据[64]。蚀变特征是重要的找矿标志。地表硅化露头、退色化带、铁锈浸染现象可直接指示矿化中心。铁染蚀变同样具有上述分带性, 成矿区多数都位于蚀变强度高值区, 此外羟基蚀变主要分布在主矿体附近, 表明对矿体具有一定的指示意义[64]。短波红外光谱可识别绢云母 2200 nm 吸收峰和高岭石双峰特征, 快速圈定蚀变带[65]。钻孔中蚀变垂向分带可预测深部矿体位置, 如浅部粘土化→深部硅化的转换带往往是矿体富集部位。总的来说通过蚀变填图和光谱测量, 可有效缩小找矿靶区, 提高勘探成功率。

5.6. 重点找矿区域预测

德化火山盆地靶区(118.2°E~118.6°E, 25.5°N~25.8°N)是闽中东部最具潜力的浅成低温热液型金矿集中区。该靶区以 NE 向断裂与火山环形构造(半径 2.3 km)复合控矿为特征, 深部找矿潜力巨大。

尤溪裂谷带靶区(118.0°E~118.3°E, 26.0°N~26.3°N)发育中温热液充填型金矿, 受政和 - 大埔断裂次级地堑控制。滑脱面为成矿流体提供了储集空间。南园组火山角砾岩孔隙度较高, 具备优良的容矿条件。

永泰构造转换带靶区(118.8°E~119.1°E, 25.8°N~26.0°N)位于脆韧性转换带, 遥感蚀变异常显著, 粘土蚀变(地开石 + 明矾石)异常面积较大, 磁负异常和叠加 IP 高极化率可指示精确定位硫化物富集段。

仙游基底隆起靶区(118.5°E~118.7°E, 25.3°N~25.6°N)以侏罗系南园组火山岩为主体, 基底斜长角闪岩为成矿提供物质基础。深部脆韧性剪切带糜棱岩带较宽, 为成矿流体提供了通道, 具有深部找矿潜力。

6. 结论

6.1. 闽中东部地区金矿成矿规律

闽中东部地区金矿成矿规律呈现出显著的复合性与阶段性特征。研究表明, 该区金矿化主要受到加里东期(436~400 Ma)和燕山期(180~102 Ma)构造-岩浆活动控制, 形成于欧亚-太平洋板块俯冲背景下的火山-岩浆弧核心区域。成矿类型多样, 以浅成低温热液型为主导, 兼具造山型金矿(与剪切带/脆韧性剪切带和构造蚀变相关)和岩浆热液型金矿成矿特征。

6.2. 找矿方向与建议

基于闽中东部地区金矿成矿规律的深入研究, 本区找矿方向应聚焦于“断裂-岩浆-地层”复合控矿体系下的有利部位。结合 1:5 万遥感蚀变筛选→1:5 万土壤地化剖面→靶区 1:1 万地物理详查(IP + AMT)→控矿断裂带槽探→验证钻孔与流体包裹体测试这些方法, 逐步确定含矿区域。

6.3. 存在问题与展望

现有研究对深部地质构造、流体演化及成矿潜力仍缺乏足够精细的实验数据支撑, 限制了对深部隐伏矿体的准确预测。希望能有机会运用高精度地球物理(如深部地震反射、大地电磁)和深钻工程, 获取深部地质构造、岩浆活动和流体系统的直接证据。

致 谢

本研究得到了福建省地质调查院、桂林理工大学的大力支持。特别感谢闽中东部各矿区工作人员提供的宝贵资料和技术支持。

参考文献

- [1] Niu, S., Guo, J., Xing, G., Huang, Z., Wu, H. and Fan, F. (2020) Magmatism, Geological Setting, Alteration, and Metallogenic Potential of Donghua Area, Dehua County, Fujian Province, Southeast China: Insights from Porphyry Zircon U-Pb and Pyrite Rb-Sr Geochronology, Geochemistry and Remote Sensing. *Ore Geology Reviews*, **126**, Article ID: 103726. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103726>
- [2] Zhang, H., Cai, Y., Zhang, Y., Ni, P., Li, S., Ding, J., *et al.* (2018) Mineralogical Characteristics of Silver Minerals from the Dongyang Gold Deposit, China: Implications for the Evolution of Epithermal Metallogenesis. *Journal of Geochemical Exploration*, **195**, 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.06.004>
- [3] Li, S., Ni, P., Bao, T., Li, C., Xiang, H., Wang, G., *et al.* (2018) Geology, Fluid Inclusion, and Stable Isotope Systematics of the Dongyang Epithermal Gold Deposit, Fujian Province, Southeast China: Implications for Ore Genesis and Mineral Exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, **195**, 16-30. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.02.009>
- [4] 雷凤至, 孙景贵, 徐智涛, 等. 福建德化地区东洋浅成热液金矿床成矿作用与成因研究[J]. 世界地质, 2019, 38(2): 339-353.
- [5] 毛光武, 谭元松, 何东辉, 等. 闽中太华山金矿区金坂矿段矿化类型及找矿方向探讨[J]. 矿床地质, 2017, 36(3): 736-748.
- [6] Ma, Y., Jiang, S. and Frimmel, H.E. (2022) Metallogeny of the Late Jurassic Qiucun Epithermal Gold Deposit in South-eastern China: Constraints from Geochronology, Fluid Inclusions, and H-O-C-Pb Isotopes. *Ore Geology Reviews*, **142**, Article ID: 104688. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104688>
- [7] Ni, P., Pan, J., Huang, B., Wang, G., Xiang, H., Yang, Y., *et al.* (2018) Geology, Ore-Forming Fluid and Genesis of the Qiucun Gold Deposit: Implication for Mineral Exploration at Dehua Prospecting Region, SE China. *Journal of Geochemical Exploration*, **195**, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.03.018>

- [8] Ma, Y., Jiang, S., Frimmel, H.E., Xiong, S., Zhu, L. and Chen, R. (2021) Early Paleozoic Orogenic Gold Deposit in the Cathaysia Block, China: A First Example from the Shuangqishan Deposit. *Gondwana Research*, **91**, 231-253. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.11.014>
- [9] 侯宗生. 福建省德化县双旗山金矿床地质特征及深部找矿潜力分析[J]. 世界有色金属, 2022(12): 78-80.
- [10] 王献忠. 福建尤溪肖坂东一带金矿成矿地质特征及成矿预测[J]. 能源与环境, 2016(2): 112-113.
- [11] 陈元廉. 福建德化西洋坂金矿地质特征及找矿前景[J]. 福建地质, 2010, 29(2): 107-110.
- [12] 黄昌旗. 福建戴云山中段变质岩中热液脉型金矿找矿前景分析[J]. 地质找矿论丛, 2015, 30(2): 234-240.
- [13] 刘钦生. 福建省德化县仙洋矿区金矿床地质特征及找矿方向[J]. 福建冶金, 2018, 47(5): 7-10.
- [14] 侯宗生. 福建省德化县安村雷潭金矿床地质特征和找矿方向[J]. 福建冶金, 2022, 51(5): 11-13.
- [15] 黄金荣. 福建省德化县下尖铜、金矿地质特征及找矿标志[J]. 企业技术开发, 2012, 31(8): 110-111.
- [16] 林泽铃. 福建德化扶枫林矿区金矿地质特征及成因探讨[J]. 福建地质, 2019, 38(3): 208-215.
- [17] 李兴城. 福建德化石头坂金矿地质特征及找矿标志[J]. 华南地质与矿产, 2015, 31(1): 61-66.
- [18] 李根坤. 福建大地构造的基本格架与金属矿产分布的关系[J]. 中国区域地质, 1982(1): 55-65.
- [19] 李海立, 肖惠良, 谢文清, 等. 福建德化北部陆相火山岩地区金矿含矿建造特征及其找矿方向[J]. 矿床地质, 2014, 33(S1): 415-416.
- [20] Li, S., Ni, P., Bao, T., Xiang, H., Chi, Z., Wang, G., *et al.* (2018) Genesis of the Ancun Epithermal Gold Deposit, Southeast China: Evidence from Fluid Inclusion and Stable Isotope Data. *Journal of Geochemical Exploration*, **195**, 157-177. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2018.01.016>
- [21] Niu, S., Guo, J., Xing, G., Huang, Z., Wu, H., Fan, F., *et al.* (2021) In Situ Mineral Chemistry of Chlorite in Donghua Area, Dehua-Youxi-Yongtai Ore District, Fujian Province, South-East China: Elemental Characteristics and Their Implications for Exploration. *Geological Journal*, **57**, 1439-1455. <https://doi.org/10.1002/gj.4349>
- [22] 黄宝. 福建邱村金矿地质特征及矿床成因研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2017.
- [23] 徐楠. 福建东洋金矿成矿系统及其成因研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [24] Chen, B.L., Wu, G.G., Zhang, D., *et al.* (2002) Study on Mineralization Age of Xiaoban Gold Deposit, Fujian Province. *Journal of China University of Geosciences*, **13**, 225-233.
- [25] Xiao, F., Fan, F., Xing, G. and Jiang, S. (2021) Ore Genesis of Qingyunshan Cu-Au Deposit in the Dehua-Youxi Area of Fujian Province, Southeastern China: Constraints from U-Pb and Re-Os Geochronology, Fluid Inclusions, and H-O-S-Pb Isotope Data. *Ore Geology Reviews*, **132**, Article ID: 104006. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104006>
- [26] 黄宝, 倪培, 项洪亮, 等. 福建邱村金矿地质特征及矿床成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(4): 650-659.
- [27] 项红亮. 福建省德化邱村金矿床地质特征和找矿方向[J]. 福建地质, 2000(2): 66-71.
- [28] 樊康. 福建省德化县邱村金矿地质特征及找矿方向[J]. 现代矿业, 2015, 31(12): 84-86.
- [29] 童兵. 福建东洋金矿蚀变矿物及黄铁矿成因矿物学研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [30] 雷凤至. 福建东洋浅成热液金矿床成因研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [31] 江启煜. 福建德化东洋矿区金矿地质特征与找矿意义[J]. 福建地质, 2015, 34(1): 27-32.
- [32] 徐智涛, 孙景贵, 雷凤至, 等. 福建东洋大坑金矿成矿动力学背景: 伴生脉岩年代学、元素地球化学制约[C]//中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会, 中国地质学会矿床地质专业委员会, 矿床地球化学国家重点实验室. 第八届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要文集. 长春: 吉林大学地球科学学院, 2017: 627.
- [33] 江启煜. 福建德化东洋矿区金矿的发现与找矿意义[J]. 地质学刊, 2015, 39(2): 301-305.
- [34] 张振宇. 福建东洋成矿带综合地球物理场特征研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [35] 樊康. 德化县双旗山金矿地质特征及找矿前景探讨[J]. 中国金属通报, 2018(9): 250-251.
- [36] 刘宗成. 福建省德化县肖坂-双旗山矿区韧性剪切带型金矿床成因初探[J]. 福建冶金, 2017, 46(3): 1-3, 8.
- [37] 寇贵存, 冯金炜, 魏美丽, 等. 福建双旗山金矿地质特征及找矿标志[J]. 云南地质, 2016, 35(1): 98-102.
- [38] 魏成翔. 综合物探方法在福建双旗山金矿区的应用[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
- [39] 丁宝林. 福建雷潭金矿地质特征及找矿预测[J]. 矿产与地质, 2007(1): 35-38.
- [40] 陈元廉. 福建德化淳湖金矿地质特征及找矿标志[J]. 福建地质, 2012, 31(2): 129-33.

- [41] 陈龙照. 福建德化青云山铜金矿地质物化探特征[J]. 福建地质, 2011, 30(4): 293-300.
- [42] 陈龙照, 吴志山. 福建省德化县青云山铜金矿地质特征及找矿方向[J]. 地质找矿论丛, 2006(S1): 30-33.
- [43] 邵其东, 钱元明, 吴登晨. 福建尤溪沉积-改造型矿床地质特征及找矿方向[J]. 地质学刊, 2013, 37(2): 225-229.
- [44] 吴开兴, 王华锋, 朱忠, 等. 福建尤溪肖坂金矿脆韧性剪切带控矿机制及找矿思路分析[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 875-876.
- [45] 张顺强, 熊欣, 刘文元, 等. 福建尤溪肖坂金矿的金矿物特征研究[J]. 福建地质, 2012, 31(1): 21-26.
- [46] 吴淦国陈, 黄仁生, 吴建设, 张达. 肖坂及其外围金矿成矿规律与找矿方向[J]. 地质力学学报, 1999(3): 58-64.
- [47] 张蔚语. 尤溪官田金矿成因类型分析及找矿标志[J]. 能源与环境, 2009(5): 91-94.
- [48] Xiao, F., Fan, F., Xing, G. and Jiang, S. (2022) Late Jurassic Epithermal Mineralization of Shitouban Au Deposit, Dehua-Youxi Area, Southeast China: Quartz Rb Sr Dating, Fluid Inclusions, and H-O-S-Pb-Sr Isotope Analyses. *Journal of Geochemical Exploration*, **236**, Article ID: 106964. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.106964>
- [49] 刘建安. 德化西乾铜金矿地质特征及成矿地质条件初探[J]. 西部探矿工程, 2006(S1): 262-264.
- [50] 黄德理. 德化县西墘矿区铜金矿成矿规律及找矿方向分析[J]. 能源与环境, 2014(1): 112-113.
- [51] 黄建平. 福建省仙游山坪洋金矿地质特征及找矿前景浅谈[J]. 福建地质, 2000(3): 119-125.
- [52] 邹清泉. 仙游县牛头山金矿化体地质特征及其找矿远景分析[J]. 科技与企业, 2012(7): 181.
- [53] 廖成平. 福建省永泰县金林溪矿区金矿地质特征及找矿方向[J]. 能源与环境, 2024(6): 41-44, 74.
- [54] Xu, X., Wang, X., Ma, Z., Liang, C. and Li, W. (2024) Petrogenesis of Episodic Volcanic-Intrusive Rocks in SE China: Crystal-Melt Segregation and Magma Mixing. *Chemical Geology*, **670**, Article ID: 122457. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122457>
- [55] 任飞, 蒋雷, 李超, 等. 胶东玲珑金矿床热液蚀变作用过程的元素迁移规律[J]. 黄金, 2025, 46(9): 16-27.
- [56] 李德东, 解洪晶, 孙燕, 等. 泵吸成矿作用: 一种流体运移动力学机制[J]. 黄金, 2023, 44(10): 71-78.
- [57] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 2007(9): 2085-2108.
- [58] Li, S., Ni, P., Wang, G., Bao, T., Huang, B. and Dai, B. (2020) The Jurassic Volcanic-intrusive Complex in the Dehua Gold Orefield, Coastal Region of SE China: Implications for the Tectonic Setting and Epithermal Mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*, **197**, Article ID: 104390. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104390>
- [59] Simmons, S.F., White, N.C. and John, D.A. (2005) Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P., Eds., *One Hundredth Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists, 485-522. <https://doi.org/10.5382/av100.16>
- [60] 朱玉磷, 刘永发, 张金塔. 福建德化下坂斑岩金矿地质特征及成因探讨[J]. 福建地质, 2009, 28(1): 21-35.
- [61] 赵建光唐, 谢朝晖. 湖南雪峰金矿田地球化学异常特征及其指示意义[J]. 黄金, 2004(9): 11-14.
- [62] 许海红, 袁炳强, 杨高印, 等. 小子域滤波联合总水平导数在重力资料处理中的应用——以内蒙古银额盆地 EQ 区块断裂构造识别为例[J]. 地质通报, 2014, 33(11): 1853-1860.
- [63] 刘长胜, 王庭洁, 陈健. 超宽频分布式国产大地电磁采集站研制[J]. 地球物理学进展, 2025, 40(5): 2286-2300.
- [64] 李萌, 郭健, 黄照强, 等. 武夷德化-尤溪-永泰矿集区遥感解译光谱特征分析[J]. 中国矿业, 2022, 31(10): 82-88.
- [65] 张红亮, 修连存, 杨凯, 等. 福建东坑火山盆地西缘金矿床热液蚀变特征——红外光谱蚀变矿物填图带来的启示[C]//中国地球物理学会金属矿勘查专业委员会. 第二届全国矿产勘查大会论文集(二). 2023: 91-94.