

# 湘东北小横江金矿床地质特征及花岗闪长岩年代学和岩石成因研究

向华, 李帅\*, 郝昱贵, 唐财利, 袁铭君, 尹红, 尹爱民

湖南省城市地质调查监测所, 湖南 长沙 410007



**摘要:**湘东北地区位于江南造山带中段,是华南最重要的黄金产地之一。为了阐明该区内小横江金矿床花岗闪长岩脉的形成时代和岩石成因,探讨区内中酸性岩浆作用与金矿化之间的关系,对小横江金矿床的花岗闪长岩脉进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年和岩石地球化学分析研究。结果表明:花岗闪长岩脉的侵位时间为早古生代[(437.2±8.0)Ma],具有高硅,中等铝含量,富碱,铁、镁、锰和低磷含量的特征,显示出 S 型花岗岩的特征;稀土元素配分曲线呈右倾,表现出微弱的 Eu 负异常,明显富集大离子亲石元素(LILEs),特别是 Rb、Th、U 和 La 等;高场强元素(HFSEs),特别是 Nb、Sr、P 和 Ti 等强烈亏损,表明矿区内的花岗闪长岩脉起源于壳源沉积物,经过部分熔融,且在形成过程中经历了较高分离结晶作用,形成于同碰撞阶段向后碰撞伸展阶段转换的构造环境中。

**关键词:**花岗闪长岩;地球化学特征;锆石 U-Pb 年龄;加里东期;小横江金矿床;湘东北

中图分类号:P618.51 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)05-0919-17 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.277  
引用格式:向华,李帅,郝昱贵,等.湘东北小横江金矿床地质特征及花岗闪长岩年代学和岩石成因研究[J].黄金科学技术,2025,33(5):919-935.XIANG Hua, LI Shuai, HAO Yugui, et al. XIANG Hua, LI Shuai, HAO Yugui, TANG Caili, YUAN Mingjun, YIN Hong, YIN Aimin. Study on Geological Characteristics, Geochronology and Petrogenesis of Gra-nodiorite in the Xiaohengjiang Gold Deposit, Northeast Hunan Province[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(5): 919-935.

湘东北地区位于江南造山带中段,作为华南最重要的黄金成矿带之一,其金矿资源占湖南省金资源总储量的70%以上(毛景文等,1997;黄建中等,2020)。该区域经历了多期构造演化,包括新元古代扬子—华夏地块碰撞,加里东期陆内造山,以及燕山期太平洋板块俯冲等事件(张国伟等,2013;Xu et al, 2017),频繁的构造—岩浆活动为金成矿提供了有利条件。区内主要赋矿层位为新元古界冷家溪群浅变质岩系,其 Au 元素背景值显著高于地壳平均值(马东升等,1991),显示出较大的成矿潜力。

已有研究表明,湘东北地区岩浆活动具有多期性,包括新元古代(约 828 Ma)、加里东期(434~421 Ma)、

印支期(250~213 Ma)和燕山期(158~131 Ma)等(许德如等,2006;李鹏春等,2007;Madayipu et al, 2023a, 2023b, 2023c;吴华浩等,2023)。也有学者指出该区矿床具有多成因复合成矿特征,金矿成矿时代主要集中于加里东期和印支期(柳德荣等,1993;胡瑞英等,1995;韩凤彬等,2010)。其中,加里东期花岗闪长岩(如板杉铺岩体)被认为是陆内造山背景下壳源熔融的产物(关义立等,2013,谭仕敏,2021;谭华杰,2022),也有学者认为金成矿流体来自古老碎屑岩基底或深部陆壳(彭建堂等,1999;苏文超等,2000)。

尽管前人对区域构造演化(舒良树,2006;许德

收稿日期:2024-08-30;修订日期:2024-11-08

基金项目:湖南省财政地质勘查项目“湖南省桃源县雷打岭矿区金矿普查”(编号:202204003)资助

作者简介:向华(1979—),男,湖南麻阳人,正高级工程师,从事地质调查与矿产勘查工作。E-mail:38153715@qq.com

\*通信作者:李帅(1987—),男,湖南沅陵人,高级工程师,从事矿产勘查研究工作。E-mail:422733402@qq.com

©Editorial Department of Gold Science and Technology(CC BY-NC-ND)

如等,2017)和岩浆岩分期(柏道远等,2010;李鹏等,2020)进行了系统研究,但关于加里东期岩浆活动与金矿化的成因联系仍缺乏深入探讨,尤其是花岗闪长岩的精确年代学、岩石成因及其与金矿化的时空耦合关系尚未明确。鉴于此,本文基于详细的地质调查,对该区内小横江金矿床的花岗闪长岩床开展了高精度LA-ICP-MS锆石U-Pb定年和全岩地球化学组成分析,旨在确定花岗闪长岩的形成年代和岩石成因,并综合分析区内加里东期金矿的成矿年代学及流体包裹体研究结果,为探讨区内中酸性岩浆作用与金矿化的关系提供线索。

## 1 区域地质背景

江南造山带地处扬子板块东南缘,由扬子板块和华夏板块在新元古代碰撞拼贴形成,主要由新元古代绿片岩相浅变质岩、花岗质侵入岩和少量镁铁质岩石组成(Ye et al,2007;Zhang et al,2012a;王孝磊等,2013)。江南造山带自形成以来经历了复杂的增生和造山运动,形成了一系列NNE-NE向深大断裂,区内新元古界中赋存的金矿床超过250个,保有金资源储量达970 t,是我国最重要的黄金产区之一(刘英俊等,1993;舒良树,2006;周金城等,2008;Deng et al,2017)。

湘东北地区位于江南造山带中段[图1(a)]。区内出露地层包括新元古界、泥盆—三叠系、白垩系和第四系。其中,新元古界青白口系冷家溪群浅变质岩平均金含量为 $3.7 \times 10^{-9}$ (马东升等,1991),高于上地壳金的平均丰度( $1.8 \times 10^{-9}$ )(Taylor et al,1985),是区内金矿床的主要赋矿围岩。区内构造主要为新宁—灰汤、长沙—平江和浏阳—醴衡3条NNE向深大断裂,同时也发育一系列NNE-近EW向韧性剪切带,二者共同构成了湘东北地盆岭相间的构造格局。区内岩浆活动频繁,具有多期次活动的特征,具体包括晋宁期、加里东期、华力西—印支期和燕山期。区内金矿床多分布于深大断裂与韧性剪切带交会处,且均位于深大断裂下盘的新元古界浅变质岩系中,受次级断裂控制,产出有黄金洞、万古和醴陵三大金矿田(许德如等,2009)。

醴陵市官庄金矿整装勘查区位于湘东北金成矿带南部[图1(b)],是湘东北重要的金矿集区,近

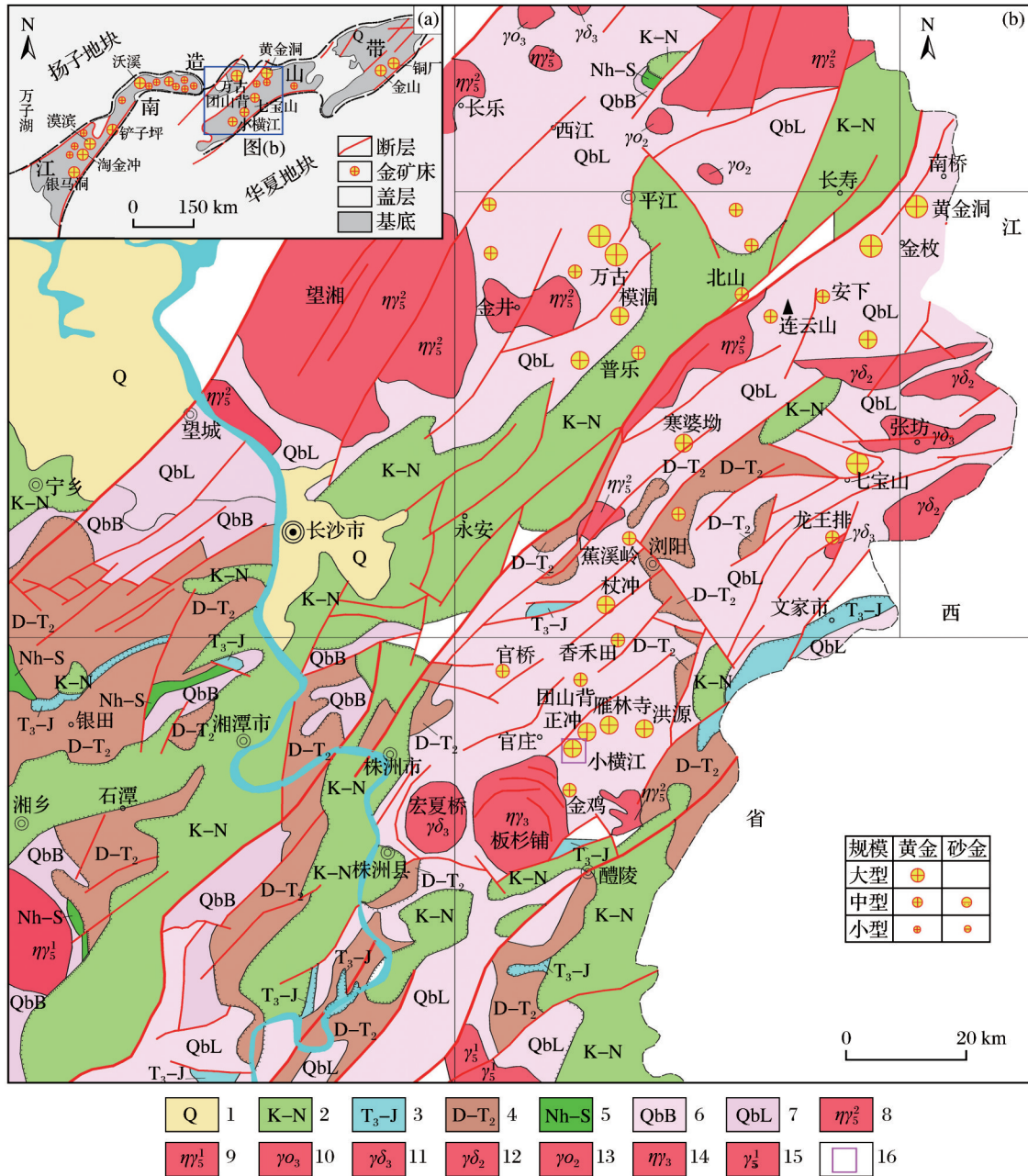
年来探获金资源量超过80 t。加里东期板杉铺岩体出露于矿区西南部,直线距离约为15 km。该岩体呈岩基状出露,出露总面积约为253 km<sup>2</sup>,岩性为中—细粒角闪石黑云母花岗闪长岩和二长花岗岩,大部分侵入冷家溪群内。其他侵入岩脉的岩石类型主要有辉绿岩、闪长岩、细粒花岗岩、花岗斑岩、煌斑岩、玄武玢岩和石英安山岩脉等。官庄整装勘查区内金矿床有洪源、杖冲、正冲、团山背、雁林寺、小横江和金鸡7处;近年来区内又相继发现多个具有潜力的金矿点,如横江冲、半边山、大之冲、荷川岭、王家湾、箭杆山、鸦雁山、枫冲和岐峰等,表明该区具有较大的金成矿潜力。

## 2 矿床地质特征

小横江金矿床位于醴陵市官庄金矿整装勘查区内,划分为铁石尖矿段和桃花矿段(图2)。矿区内主要出露地层为新元古界冷家溪群黄浒洞组(Qbh),是该矿床的赋矿地层,主要由一套具复理石和类复理石建造特征的深海—半深海相浅变质碎屑岩组成,以各种变质砂岩和变质粉砂岩为标志。具体而言,矿区内黄浒洞组可划分为3段,矿床主矿体V<sub>3-1</sub>和V<sub>4-1</sub>均赋存于第一段(Qbh<sup>1</sup>)。矿区内构造以断裂为主,具体可划分为NE、近SN和NW向3组,具有多期活动的特征。其中,近SN向断裂最为发育,规模较大者有5条,编号分别为F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub>、F<sub>4</sub>和F<sub>9</sub>,这些断裂为主要的容矿构造。

矿区内围岩蚀变强烈,主要包括硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化和毒砂化,地表矿脉带中可见较强的褐铁矿化。其中,金矿化与硅化、黄铁矿化、毒砂化关系较为密切,围岩蚀变以金矿体为中心,强度向外逐渐变弱,分带性不明显。黄铁矿化呈浸染状或细脉状,一般靠近矿体处黄铁矿化较强,远离矿体黄铁矿化逐渐减弱,黄铁矿化与金矿化关系最为密切,硅化、绿泥石化常与黄铁矿化伴生,最为典型的蚀变矿物组合为黄铁矿—石英—绿泥石。

根据典型矿物组合和矿石结构构造特征的差异,可将矿石类型划分为破碎蚀变板岩型金矿石和硫化物石英脉型金矿石(图3)。破碎蚀变板岩型金矿石由强烈黄铁矿化、毒砂化和硅化板岩组成,多

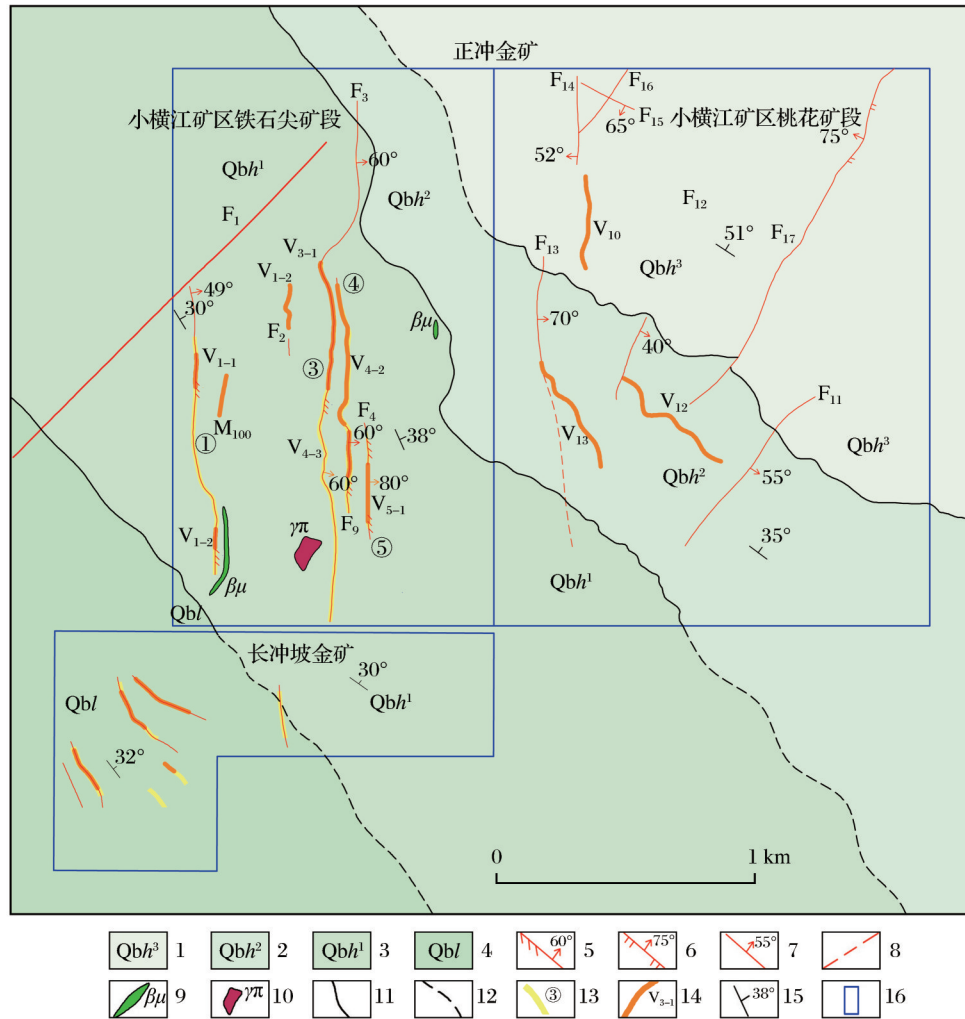


1. 第四系; 2. 白垩-古近系; 3. 三叠-侏罗系; 4. 泥盆-二叠系; 5. 南华-志留系; 6. 新元古界青白口系板溪群; 7. 新元古界青白口系冷水家溪群; 8. 燕山早期二长花岗岩; 9. 印支期二长花岗岩; 10. 加里东期英云闪长岩; 11. 加里东期花岗闪长岩; 12. 武陵期花岗闪长岩; 13. 武陵期斜长花岗岩; 14. 加里东期二长花岗岩; 15. 印支期花岗岩; 16. 小横江金矿床范围

图1 江南造山带大地构造位置(a)(修改自毛景文等, 1997)和湘东北醴陵官庄金矿整装勘查区区域地质简图(b)  
Fig. 1 Sketch map of geotectonic location of the Jiangnan orogenic belt (a) (modified after Mao et al, 1997) and regional geological map of the Liling Guanzhuang gold exploration district, northeast Hunan Province (b)

分布于断裂破碎带两侧, 矿石呈块状构造和碎裂结构, 毒砂和黄铁矿呈星点状或浸染状分布, 流劈理发育, 沿流劈理分布有石英微细脉和黄铁矿微细脉[图3(a)]。硫化物石英脉型金矿石中主要脉石矿

物为石英, 通常呈条带状和网脉状构造, 结构多为粒状变晶和交代残余结构; 矿石节理和裂隙发育, 石英常较为破碎, 部分呈角砾状, 常见强蚀变板岩条带或碎块夹于脉中[图3(b)]。总体来说, 2种类



1. 青白口系黄浒洞组第三段; 2. 青白口系黄浒洞组第二段; 3. 青白口系黄浒洞组第一段; 4. 青白口系雷神庙组; 5. 实测压扭性断层; 6. 实测逆断层; 7. 实测性质不明断层; 8. 推测断层; 9. 辉绿岩; 10. 花岗闪长岩; 11. 实测整合接触地质界线; 12. 推测整合接触地质界线; 13. 金矿化蚀变带及编号; 14. 金矿体及编号; 15. 岩层产状; 16. 金矿床范围

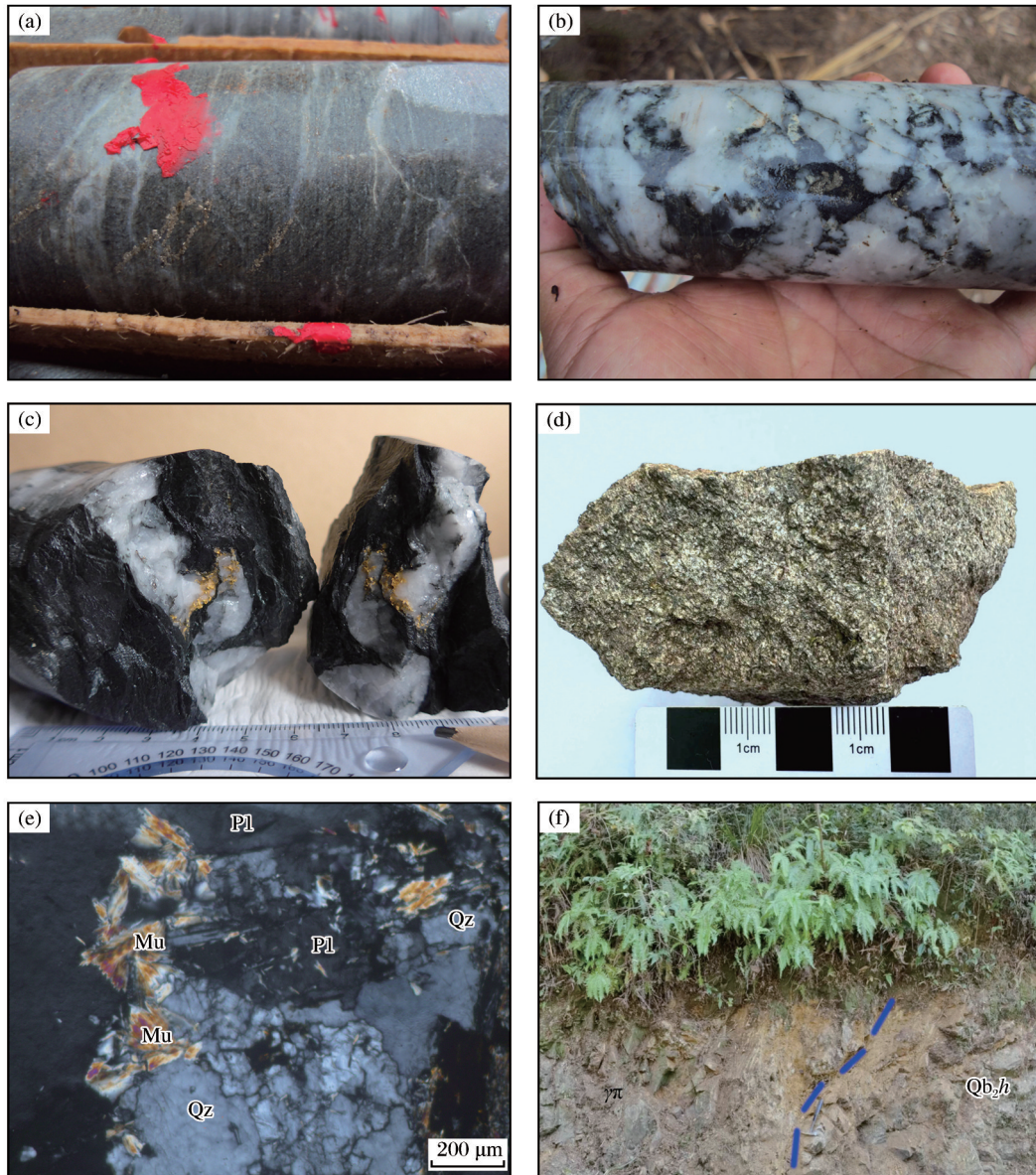
图2 小横江金矿床主要构造及岩浆岩分布图

Fig. 2 Main structure and distribution map of magmatic rocks in the Xiaohengjiang gold deposit

型矿石中的矿石矿物均以金矿物和伴生硫化物为主,其中金矿物主要为自然金[图3(c)],偶见银金矿,自然金颗粒呈金黄色,主要形态为枝叉状和不规则状,其次为片状,表面光洁,极少见有氧化铁薄膜,大小相差悬殊,其中可见金较少,大部分为赋存于其他矿物(石英、毒砂和黄铁矿)或蚀变破碎岩石裂隙晶隙中的微细粒金。黄铁矿和毒砂通常与金矿物紧密共生,二者为不可见金的重要载金矿物,其他的伴生硫化物还包括方铅矿、闪锌矿、黄铜矿和辉锑矿等。脉石矿物以石英、绢云母和绿泥石为主;石英和绢云母在不同类型的矿石中含量变化较

大,含金石英脉型矿石中,石英含量大于99%,而破碎蚀变板岩型矿石中则以绢云母为主,石英含量为10%~20%。矿石中明显可见2期热液石英脉:成矿早期的贫矿乳白色石英呈透镜状或似层状,经历构造破碎;成矿主阶段的石英则呈细脉状穿插在破碎板岩中,呈不等粒他形一半自形状,其颗粒间或破碎部位分布有少量黄铁矿、毒砂和绿泥石。

区内发现岩浆岩3处,地表出露为小规模花岗闪长岩和辉绿岩(龚建平等,2017)。花岗闪长岩产于矿区曾家排附近,走向NE,出露范围约为60 m × 30 m,风化较强烈。花岗闪长岩具片状、粒状细晶



(a)蚀变板岩型金矿石;(b)硫化物石英脉型金矿石;(c)可见裂隙明金矿石;(d)花岗闪长岩手标本;(e)花岗闪长岩显微照片(正交偏光);(f)花岗闪长岩野外露头; $\gamma\pi$ -花岗闪长岩; $Qb_2h$ -青白口系黄浒洞组;Qz-石英;Mu-白云母;Pl-斜长石

图3 小横江金矿花岗闪长岩野外、样品及显微结构照片

Fig. 3 Field, sample and microstructure photos of granodiorite in the Xiaohengjiang gold deposit

和花岗结构,块状构造[图3(d)、3(e)],岩石云英岩化强烈,白云母不均匀交代早期的斜长石和石英,主要矿物组成包括石英(46%~48%)、白云母(20%~23%)、变余斜长石(22%~24%)、少量金属矿物(3%~10%)和绿泥石(1%~2%)。花岗闪长岩与围岩接触带可见黄铁矿化和硅化[图3(f)],地表金品位为 $0.12\times 10^{-9}$ ~ $0.36\times 10^{-9}$ 。

### 3 样品采集与分析测试方法

本研究用于开展全岩地球化学组成分析和锆石U-Pb定年的8件花岗闪长岩样品(编号:TSJ-H1~TSJ-H8),均采集自湖南省醴陵市小横江金矿床曾家排附近。单矿物分选、锆石制靶、扫描电镜阴极发光拍照和锆石U-Pb定年工作在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完

成,全岩地球化学组成分析在国土资源部长沙矿产资源监督检测中心完成。

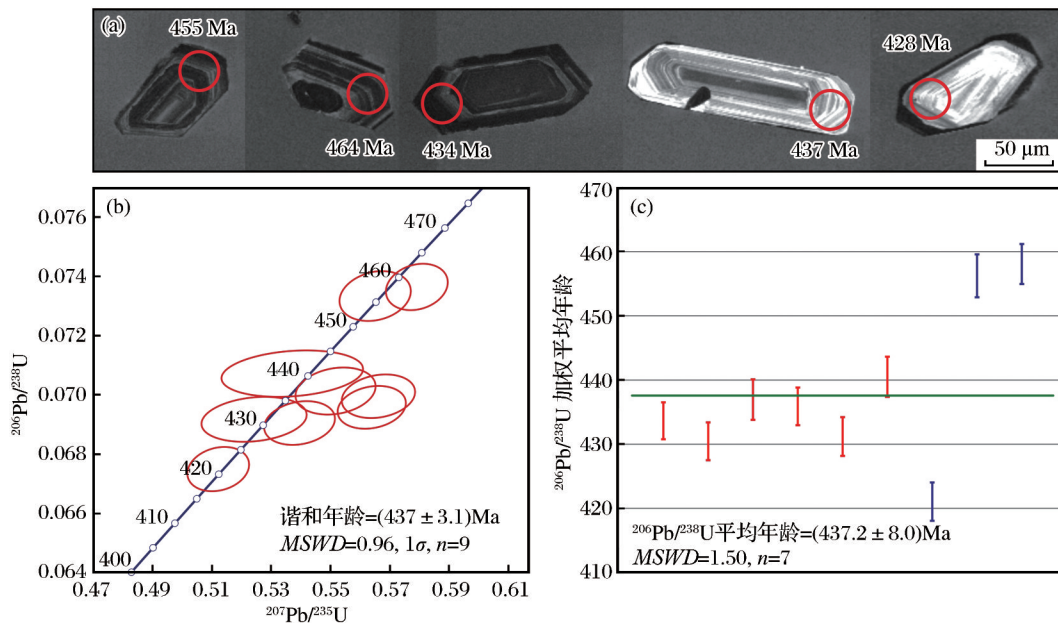
锆石阴极发光图像拍摄,使用德国 Zeiss Sigma 300 场发射环境扫描电镜,配备有 Oxford Instruments X-MaxN 能谱系统和 Gatan Mono CL4 阴极发光系统。原位 U-Pb 同位素测年,利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)分析完成,该仪器采用德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas 2005 ns 激光剥蚀系统,该系统由德国 Lambda Physik 公司生产的 ComPex102 型 Ar-F 气态准分子激光器(波长为 193 nm)和 MicroLas 公司的光学系统组成。与激光剥蚀系统相连的等离子质谱仪为 Agilent7500a 型质谱仪,用以获取样品信号强度,激光剥蚀的斑束直径为 32  $\mu\text{m}$ ,剥蚀频率为 6 Hz。工作软件 Agilent Chemstation 记录每一次分析的信号。离线的数据分析,包括信号段选取、分析信号与空白信号积分、时间漂移校正、U-Pb 定年和微量元素含量定量校正,由实验室内部软件 ICPMSDataCal 处理,处理过程详见文献(Li et al, 2010; Liu et al, 2010)。采用标准锆石 91500 作为 U-Pb 定年校正的外部标准样品。采用国际行业软件 Isoplot 4.0 绘制锆石 U-Pb 年龄谐和图、频率分布图并计算年龄的加权平均

值,其中频率分布图中密度曲线采用自适应核密度估计方式计算获得(Vermeesch, 2012)。

全岩主量元素、微量元素和稀土元素分析工作由长沙矿产资源监督检测中心完成。其中,主量元素采用 Axios MaxX 荧光光谱法测定,分析精度为 0.1%~1.0%,稀土元素和微量元素采用混合酸溶矿制样,由 Thermo X series 2 型电感耦合等离子质谱仪测定,分析精度为 1.5%。

#### 4 分析结果

花岗闪长岩中锆石的扫描电镜阴极发光图像如图 4(a)所示。这些自形一半自形锆石晶体呈短柱状,多为半透明,颗粒大小为 60~150  $\mu\text{m}$ ,长宽比范围为 2:1~3:1,显示出典型的振荡韵律环带结构,表明其具有岩浆成因特征。锆石 U-Pb 定年的综合结果见表 1 和图 4。由表 1 可知,锆石 Th 和 U 含量分别为  $84\times 10^{-6}$ ~ $308\times 10^{-6}$  和  $196\times 10^{-6}$ ~ $548\times 10^{-6}$ , Th/U 比值为 0.35~0.56。部分测试点含有少量普通铅,偏离谐和线,而落在谐和线上的锆石年龄可划分为 3 组:~421 Ma、437 Ma 和~457 Ma[图 4(b)]。其中,第 2 组最为集中,谐和度为 95%~99%,经普通 Pb 校正后, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄较为一致,加权平均年龄



(a) 锆石阴极发光(CL)图像和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄;(b) LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄;(c)  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄

图 4 小横江金矿床花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄图

Fig. 4 Zircon U-Pb age diagrams of granodiorite in the Xiaohengjiang gold deposit

表1 花岗闪长岩中锆石LA-ICP-MS U-Pb定年结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating results of zircons in granodiorite

点位编号	Th/ ( $\times 10^{-6}$ )	U/ ( $\times 10^{-6}$ )	Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$
TY4020-3	199	487	0.41	0.0590	0.0009	0.5640	0.0076	0.0696	0.0005	454	5	434	3
TY4020-6	206	548	0.38	0.0567	0.0008	0.5396	0.0079	0.0691	0.0005	438	5	430	3
TY4020-9	100	284	0.35	0.0571	0.0009	0.5517	0.0089	0.0701	0.0005	446	6	437	3
TY4020-10	144	293	0.49	0.0588	0.0008	0.5662	0.0082	0.0700	0.0005	456	5	436	3
TY4020-27	125	264	0.47	0.0560	0.0011	0.5242	0.0117	0.0692	0.0005	428	8	431	3
TY4020-28	308	547	0.56	0.0566	0.0014	0.5371	0.0158	0.0707	0.0005	437	10	440	3
TY4020-49	92	196	0.47	0.0549	0.0006	0.5121	0.0069	0.0675	0.0005	420	5	421	3
TY4020-11	84	206	0.41	0.0559	0.0007	0.5651	0.0079	0.0733	0.0006	455	5	456	3
TY4020-19	178	386	0.46	0.0574	0.0006	0.5792	0.0069	0.0736	0.0005	464	4	458	3

为(437.2±8.0)Ma(1 $\sigma$ , MSWD=1.5),代表该花岗闪长岩样品的结晶年龄。

花岗闪长岩样品的全岩主量元素组成见表2,微量和稀土元素组成见表3。测试结果显示,花岗闪长岩样品具有高硅,中等铝含量,富碱,铁、镁、锰和低磷含量的特征。由表2可知,SiO<sub>2</sub>含量为66.43%~68.40%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为14.91%~16.60%,总碱(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)为5.07%~5.80%,镁铁质(MgO+MnO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>)含量

为5.62%~6.21%。在TAS判别图解[图5(a)]中,所有样品均落入花岗闪长岩区域内。为避免蚀变对样品的影响,进一步使用Zr/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>判断图解[图5(b)]对这些样品进行分类,该图解显示出与TAS图解相同的结果。在SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O图解[图5(c)]中,分别有4件样品落入高钾钙碱性区域和钙碱性区域。在Zr-TiO<sub>2</sub>判别图[图5(d)]中,这些样品均分布于S型花岗岩区域。

表2 花岗闪长岩主量元素组成

Table 2 Major elements composition of granodiorite (%)

样品编号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	LOI	总计
TSJ-H1	68.31	14.91	4.01	0.19	1.71	2.52	2.94	0.43	0.06	0.06	3.04	98.18
TSJ-H2	67.72	15.62	3.80	0.39	1.59	2.61	3.06	0.42	0.06	0.06	3.13	98.46
TSJ-H3	66.43	16.60	3.49	0.15	1.94	3.35	2.45	0.44	0.09	0.05	3.12	98.11
TSJ-H4	68.40	15.21	3.50	0.34	1.72	2.94	2.42	0.44	0.08	0.05	3.22	98.32
TSJ-H5	67.21	15.89	3.33	0.32	1.84	3.15	2.63	0.45	0.10	0.06	2.95	97.93
TSJ-H6	67.97	15.10	3.51	1.62	1.63	2.56	2.51	0.43	0.06	0.05	3.01	98.45
TSJ-H7	66.83	16.17	3.42	0.16	1.87	3.05	2.55	0.42	0.06	0.05	2.96	97.54
TSJ-H8	68.02	14.90	3.89	0.21	1.69	2.54	2.66	0.41	0.07	0.06	3.06	97.51

由表3可知,所有样品的稀土总量较低且变化范围小(142.53×10<sup>-6</sup>~178.80×10<sup>-6</sup>),其中轻稀土元素(LREE)含量为135.26×10<sup>-6</sup>~169.50×10<sup>-6</sup>,重稀土元素(HREE)含量为7.27×10<sup>-6</sup>~9.30×10<sup>-6</sup>。同时,球粒陨石标准化稀土元素配分曲线呈右倾趋势,显示出轻稀土富集的特征,部分样品表现出弱负Eu异常[图6(a)], $\delta\text{Eu}$ 值为0.75~0.80(平均值为0.76),轻重稀土之间分馏明显,(La/Yb)<sub>N</sub>为31.42~34.40(平均值为32.41)。此外,由原始地幔标准化微量元素蛛网

图[图6(b)]可知,分析样品明显富集大离子亲石元素(LILEs),特别是Rb、Th、U和La等;高场强元素(HFSEs)亏损,特别是Nb、Sr、P和Ti等强烈亏损。

## 5 讨论

### 5.1 成岩年代

研究区内中酸性岩浆活动非常活跃,具体可划分为新元古代、加里东期、印支期和燕山期4个时期。其中,新元古代主要岩性为花岗闪长岩和黑云

表3 花岗闪长岩微量和稀土元素组成

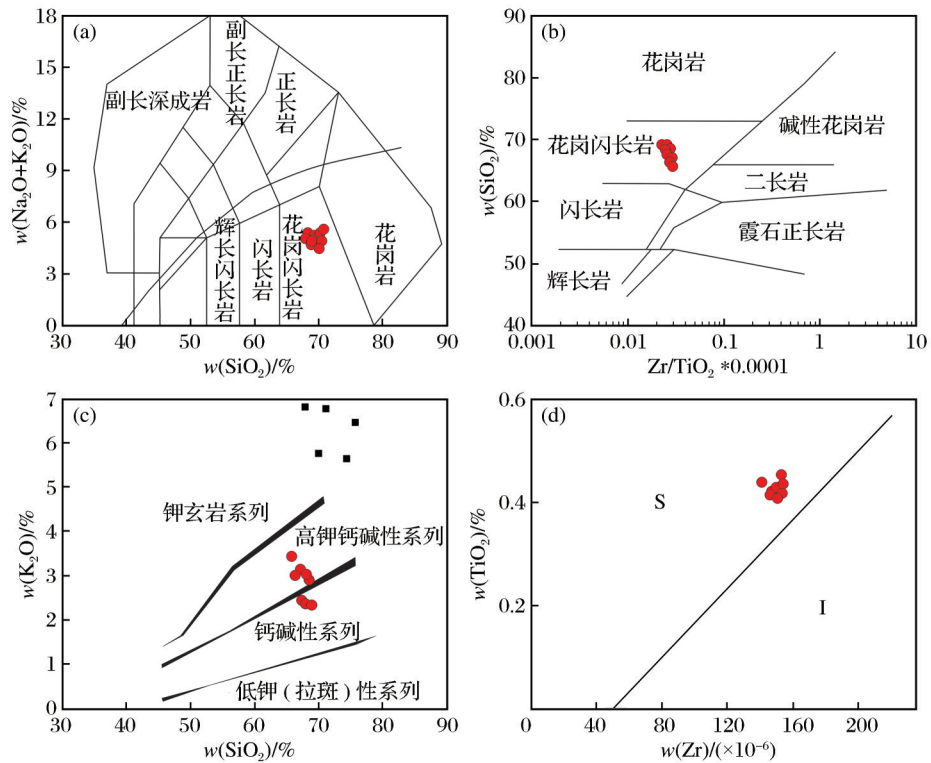
Table 3 Trace elements and rare earth elements composition of granodiorite ( $\times 10^{-6}$ )

样品编号	Sc	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb	Sr	Y	Zr
TSJ-H1	10.8	68.1	187	496	29.0	118	5.00	77.9	18.6	1.58	135	84.4	6.73	150
TSJ-H2	10.7	68.1	172	469	27.2	108	5.78	76.0	18.6	1.55	144	93.8	7.17	147
TSJ-H3	11.0	74.0	176	358	28.9	120	19.90	59.2	21.6	1.63	181	71.3	10.40	154
TSJ-H4	10.4	70.3	173	386	30.6	126	7.95	57.8	20.0	1.55	152	65.6	8.02	141
TSJ-H5	11.3	76.6	171	484	34.7	138	15.20	72.7	20.3	1.61	166	75.7	9.85	153
TSJ-H6	10.6	74.3	180	463	29.2	131	14.60	63.3	20.6	1.59	157	83.5	8.44	150
TSJ-H7	10.9	73.9	169	367	29.3	112	17.60	73.1	21.1	1.62	175	73.4	10.10	151
TSJ-H8	11.1	68.4	182	481	31.4	126	5.23	66.5	19.9	1.57	141	86.3	6.93	149
样品编号	Nb	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
TSJ-H1	2.18	517	36.8	63.5	6.97	23.5	3.63	0.86	3.27	0.369	1.44	0.264	0.833	0.126
TSJ-H2	1.99	553	40.8	69.7	7.61	25.8	4.05	0.94	3.52	0.407	1.50	0.280	0.876	0.132
TSJ-H3	2.10	726	49.4	74.9	9.00	30.3	4.74	1.16	4.13	0.497	1.93	0.358	1.040	0.156
TSJ-H4	1.48	620	42.0	68.4	7.93	26.7	4.11	1.00	3.72	0.437	1.78	0.310	0.952	0.145
TSJ-H5	2.08	680	46.7	73.0	8.71	29.8	4.75	1.12	4.14	0.511	2.13	0.376	1.110	0.166
TSJ-H6	1.86	675	43.3	70.2	7.16	27.1	4.32	1.01	3.93	0.508	2.01	0.298	1.030	0.162
TSJ-H7	2.06	711	49.1	74.4	8.37	28.6	4.70	1.09	4.06	0.493	1.90	0.361	1.050	0.152
TSJ-H8	2.01	540	38.6	67.9	7.55	25.4	3.92	0.92	3.36	0.401	1.40	0.278	0.859	0.136
样品编号	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Th	U	$\Sigma$ REE	LREE	HREE	LREE/HREE	
TSJ-H1	0.844	0.129	3.69	0.180	149	0.730	41.3	18.9	3.68	143	135	7.27	18.6	
TSJ-H2	0.910	0.140	4.22	0.231	145	0.774	37.6	20.6	4.09	157	149	7.77	19.2	
TSJ-H3	1.030	0.157	3.95	0.228	153	0.982	17.1	20.7	4.59	179	170	9.30	18.2	
TSJ-H4	0.954	0.143	3.72	0.154	117	0.819	21 698.0	19.5	4.60	159	150	8.44	17.8	
TSJ-H5	1.060	0.167	3.74	0.242	162	0.923	20.9	20.3	4.16	174	164	9.66	17.0	
TSJ-H6	0.976	0.154	3.76	0.190	127	0.830	21.1	19.2	4.33	162	153	9.07	16.9	
TSJ-H7	1.010	0.148	3.88	0.223	146	0.911	18.5	20.5	4.52	175	166	9.17	18.1	
TSJ-H8	0.878	0.131	4.04	0.211	150	0.749	40.2	19.6	3.97	152	144	7.45	19.4	

母二长花岗岩,形成年龄约为828 Ma,属于江西九岭复式岩体西延部分(李鹏春等,2007;柏道远等,2010)。加里东期主要岩体有板杉铺、宏夏桥和金鸡等,主要岩性为花岗闪长岩,形成年龄为434~421 Ma(许德如等,2006;李建华等,2015;谭华杰,2022)。印支期主要岩性为二长花岗岩、花岗斑岩和黑云母花岗闪长岩,主要分布在区域南部的望湘和丫江桥岩体地区,偶见于团山背和肖家山矿区,形成年龄为250~213 Ma(李鹏春等,2007;于玉帅等,2019;谭仕敏,2021;谭华杰,2022)。燕山期主要岩性为二长花岗岩,主要分布在幕阜山和连云山等地区,多呈岩基或大岩株产出,并在岩体周边发育大量岩脉和小岩枝,形成年龄为158~131 Ma(许

德如等,2017;张鲲等,2017;李鹏等,2017,2020)。整体而言,该区域的岩浆活动显示出多期性,因此,精确限定矿区内中酸性岩脉的成岩年龄是了解这些中酸性岩浆在成矿过程中具体作用的首要步骤。

为了确保锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年的准确性,通过扫描电镜阴极发光图像,避开了锆石的蚀变增生边和继承锆石。在剔除 Pb 丢失的测试点后,获得较为精确的锆石结晶年龄为(437.2 $\pm$ 8.0)Ma,且具有良好的谐和性。这一年龄指示了矿区内花岗闪长岩脉的形成时间,与区内板杉铺和宏夏桥地区花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄[分别为(432.4 $\pm$ 2.6)Ma和(434.3 $\pm$ 2.7)Ma]相近(关义立等,2013)。此外,官庄金矿整装勘查区内的正冲、团山背和梨树坡矿



(a) TAS图解(Middlemost, 1994); (b) Zr/TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>图解(Rickwood, 1989); (c) SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O图解(Rickwood, 1989); (d) Zr-TiO<sub>2</sub>图解(Chappell, 1999)

图5 花岗闪长岩地球化学分类图解

Fig. 5 Geochemical classification diagrams of the granodiorite

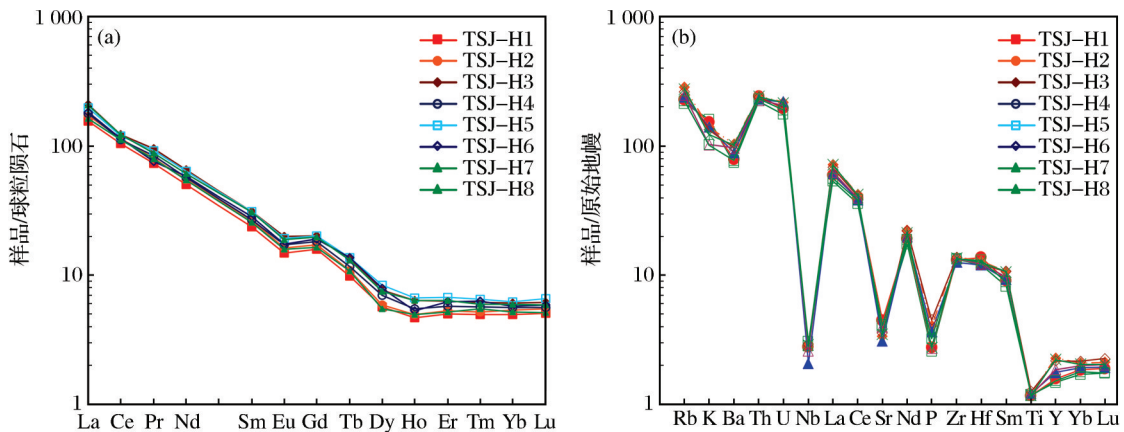


图6 花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 6 Rare earth elements chondrite-normalized pattern(a) and trace elements primitive mantle-normalized spider diagram(b) of granodiorite

注:球粒陨石的数据来源于 Boynton (1984), 原始地幔的数据来源于 Sun et al (1989)

区通过钻孔揭示的隐伏花岗闪长岩也形成于434~421 Ma(谭仕敏, 2021; 谭华杰, 2022), 这些年龄均记录了区内加里东期中酸性岩浆活动。

在小横江金矿床内, 花岗闪长岩与围岩接触带附近的板岩中可见黄铁矿化, 其金品位为0.12×

10<sup>-9</sup>~0.36×10<sup>-9</sup>, 具有较大的找矿潜力。值得注意的是, 醴陵市官庄金矿整装勘查区内的金矿体与花岗闪长岩在空间上普遍共存。例如, 团山背矿区内金盆金矿的主要矿体产于蚀变板岩与花岗闪长岩的内外接触带, 其产状随花岗闪长岩的接触带而变

化;长莲金矿的金矿体主要集中在石英斑岩脉顶底板附近;横江冲、金鸡和正冲金矿的部分矿脉产于岩体中及接触带附近。可见,小横江及矿集区内其他矿床内中酸性侵入岩与金矿化在空间上存在紧密联系,小横江矿床内的花岗闪长岩形成于加里东期,暗示着官庄金矿整装勘查区内可能存在一期与加里东期中酸性侵入岩相关的金矿化事件。以往成矿年代学研究也证实湘东北金成矿带中存在加里东期的金矿化事件,区域上相邻的黄金洞金矿床中白云母的 Ar-Ar 同位素年龄为 399~397 Ma (Deng et al, 2020),且团山背金矿床 NW 向石英脉中独居石的 U-Pb 年龄和铁白云石的 Sm-Nd 年龄分别为  $(410.0 \pm 6.9)$  Ma 和  $(410 \pm 15)$  Ma (谭仕敏, 2021)。综上所述,笔者认为小横江矿区内的花岗闪长岩及其接触带可能是今后“增储勘查”的新方向。

## 5.2 岩石成因

小横江金矿床内的加里东期花岗质岩脉总体具有高  $Al_2O_3$  ( $\geq 14.9\%$ )、低 Y ( $\leq 10.1 \times 10^{-6}$ ) 和低 Yb ( $\leq 1.03 \times 10^{-6}$ ) 特征,但其显著亏损 Sr 和 Ba 的特征明显区别于附近板杉铺加里东期埃达克质花岗闪长岩 (Defant et al, 1990; 许德如等, 2006; Castillo, 2012)。这表明区域内加里东期的岩浆岩可能具有不同的侵入期次,并在岩石成因和构造背景上存在显著差异,对小横江金矿内的花岗闪长岩脉进行岩石成因研究,有助于深入了解其与区域金成矿作用的关系。矿区内的花岗闪长岩普遍遭受强烈的热液蚀变影响,原有的火成岩结构被破坏,并发生硅化、绿泥石化、绢云母化、黄铁矿化和碳酸盐化等蚀变。尽管本文在进行样品选择时尽量规避了蚀变,但由于区内花岗闪长岩的 LOI 较高 (2.95%~3.22%), 因此在进行岩石成因讨论前,首先评估这些岩石的地球化学元素是否发生迁移。花岗闪长岩 LOI 与全岩微量元素的双变量图解 (图 7) 显示,区内花岗闪长岩中的 Ba、Sr、Zr、Yb、Th、Y、La 和 Sm 等元素含量与 LOI 含量均无明显的相关性,表明这些元素的含量基本未受热液蚀变的影响。

依据典型矿物组合和地球化学特征,可将花岗质岩石划分为 I 型、S 型和 A 型 (Whalen et al, 1987; Chappell, 1999)。A 型花岗岩通常含有较高的 Ga、Zr、Nb、Y 和稀土元素 (REE) 含量,而区内花岗闪长岩的 REE 含量较低,Zr 含量为  $141.11 \times 10^{-6}$ ~

$154.02 \times 10^{-6}$ , 远低于 A 型花岗岩的标准 ( $> 500 \times 10^{-6}$ ) (Whalen et al, 1987), 因此可以排除 A 型花岗岩的可能性。稀土元素配分曲线呈右倾并伴有微弱的 Eu 负异常,原始地幔标准化微量元素蛛网图显示样品的 Nb 和 Ti 具有明显的负异常,这些特征均显示出 S 型花岗岩的特征 (Chappell et al, 1974)。

微量元素中不相容元素的比值通常不受岩浆分异结晶作用和部分熔融的影响,因此利用 Nb/Ta、La/Nb 等比值可以有效判别岩浆源区性质 (Taylor et al, 1985)。矿区内的花岗闪长岩源区显示出典型的地壳特征。具体而言,样品的 Nb/Ta 比值为 8.7~12.1, 平均值为 9.6, 介于地壳 Nb/Ta 比值 (8~12) 之内 (Rudnick et al, 2003), 暗示其以壳源沉积物为源岩。本文观点也得到了前人全岩同位素地球化学数据的支持,附近的板杉铺和宏夏桥岩体  $\epsilon Nd(t)$  为 -7.7~-6.9, 且具有较高的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  比值 (0.7130~0.7169) 和较老的年龄 ( $t_{DM2}=1729 \sim 1795$  Ma) (关义立等, 2013), 这些特征共同暗示了区域内的加里东期中酸性岩体可能来源于中—古元古代下地壳部分熔融。此外,稀土元素 La-La/Sm 判别图解 [图 8(a)] 显示,区内花岗闪长岩的 La/Sm 比值具有平缓趋势,且 La 含量与 La/Sm 比值无相关性,表明分异结晶作用在花岗闪长岩的形成过程中起到至关重要的作用。较低的 MgO 和  $P_2O_5$  含量也表明,形成花岗闪长岩的岩浆可能经历了显著的分异结晶作用。在哈克图解中, MgO、 $Al_2O_3$  与  $SiO_2$  呈显著负相关 [图 8(b)、8(c)], 指示黑云母和斜长石等矿物的分异结晶。花岗闪长岩  $TiO_2$  与  $SiO_2$  呈负相关性,通常指示岩浆演化过程中含钛矿物的优先结晶分离 [图 8(d)], 而 Ba 和 Sr 的显著亏损则表明斜长石的大量分异结晶。

综上所述,小横江金矿床内的加里东期花岗闪长岩脉显示出 S 型花岗岩的特征,其母岩浆主要来源于地壳沉积物的部分熔融,并经历了较高分离结晶作用。

## 5.3 构造背景及金成矿潜力

湘东北地区位于江南造山中部,其构造格局受华南板块运动的影响,即华南板块在加里东期处于冈瓦纳大陆的东部地区,板块碰撞和拼合造成区域性的陆内褶皱—造山运动 (Wang et al, 2007; Faure et al, 2009; Wang et al, 2010; Wilhem et al, 2012)。

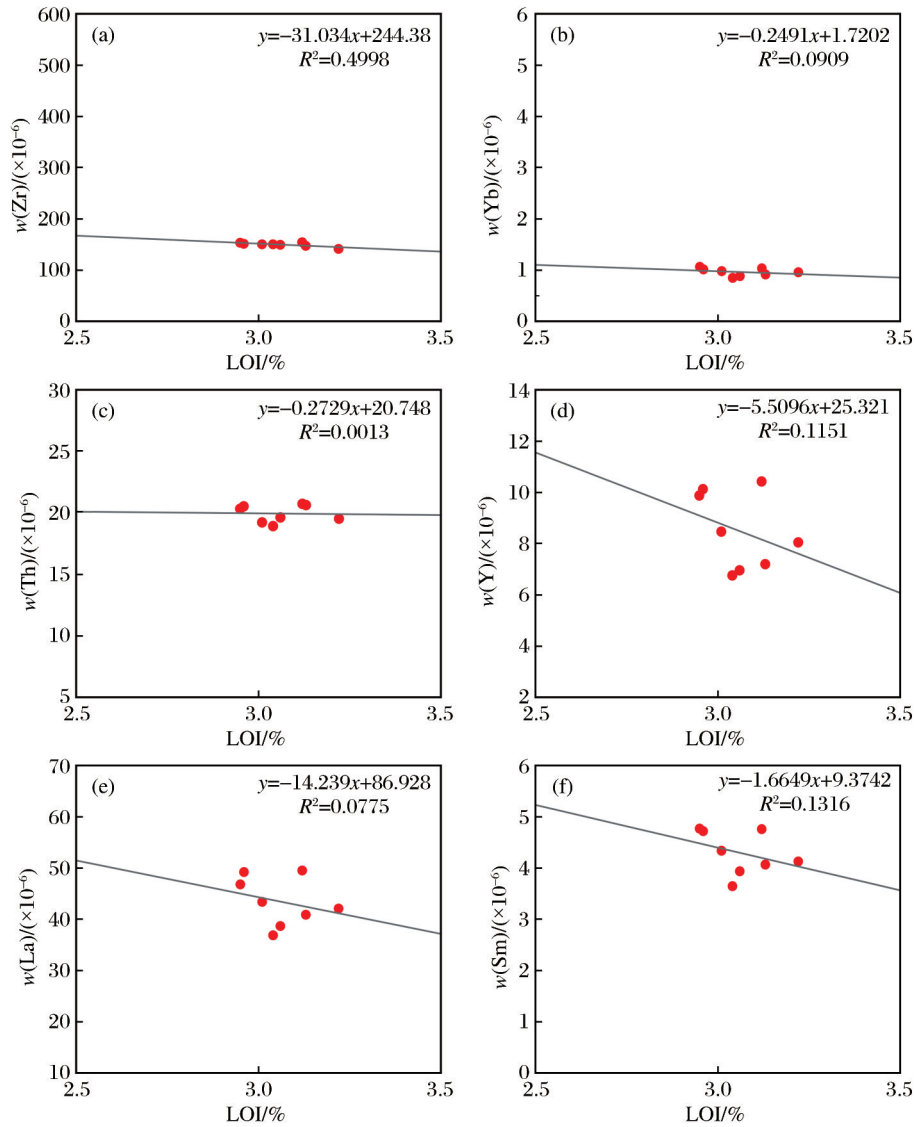


图7 花岗闪长岩LOI与全岩微量元素图解

Fig. 7 Diagram of Loss-On-Ignition(LOI) of granodiorite and whole-rock trace elements

在(Y+Nb)-Rb构造判断图解[图9(a)]上,小横江金矿内的花岗闪长岩样品均落在火山弧花岗岩与同碰撞花岗岩边界处;在Y-Nb图解[图9(b)]中,样品均落在火山弧+同碰撞花岗岩区域。此外,花岗闪长岩脉的形成年龄(约为437 Ma),暗示着其形成的动力学背景可能与华南板块加里东期的陆内褶皱—造山作用有关。主造山期的地壳挤压增厚与造山后的地壳伸展减薄构成了华南早古生代陆内造山过程的一个完整构造旋回(Faure et al, 2009;张苑等,2011)。

其中,主造山期的地壳挤压造成了区域前泥盆

纪地层广泛褶皱、华夏地块基底强烈韧性剪切、大规模重熔型岩浆活动和高级变质作用,目前相关成岩成矿年代学将陆内挤压造山作用限制于460~420 Ma(于津海等,2005;舒良树,2006;徐先兵等,2009;Faure et al, 2009;李建华等,2015)。而造山后的地壳伸展减薄,在华南板块形成的一系列后造山岩浆岩、张扭性韧性剪切和退变质作用,其形成时间介于420~400 Ma(Faure et al, 2009;徐先兵等,2009;Li et al, 2010;Zhang et al, 2012b)。丘元禧等(1996,1998)认为华南加里东褶皱带是一个弧—陆碰撞造山带。许德如等(2006)对湘东地区板杉铺

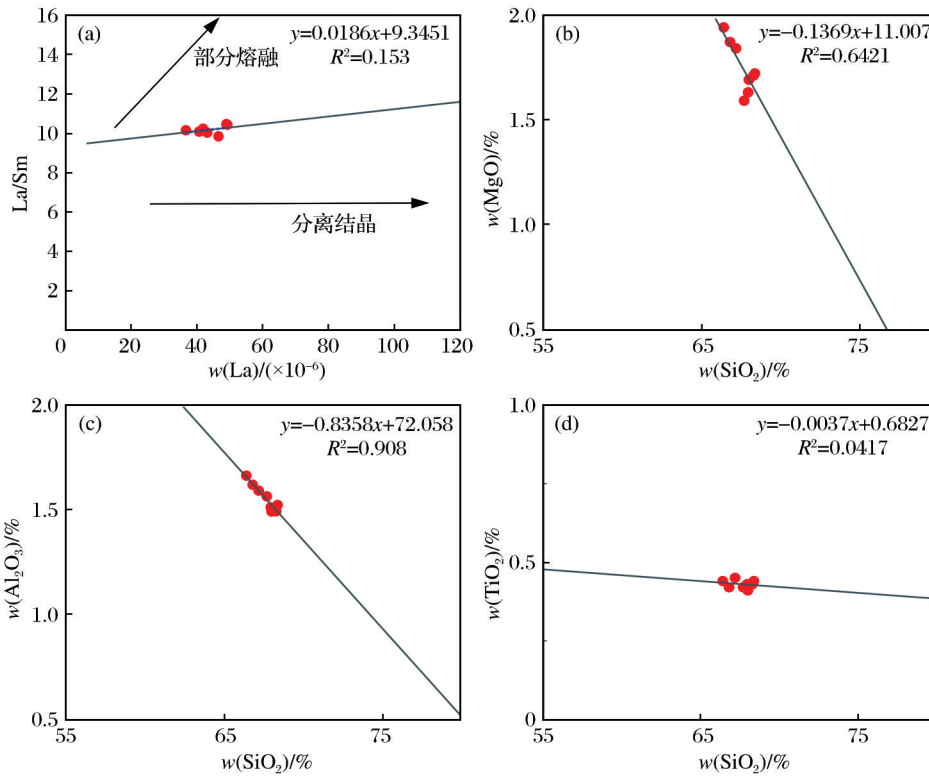


图8 花岗闪长岩 La-La/Sm 图解(a)和哈克图解(b、c、d)

Fig. 8 La-La/Sm(a) and Harker(b、c、d) diagrams of the granodiorite

加里东期岩体的研究表明,华南洋片沿NW向向扬子板块东南缘俯冲,与大陆边缘弧发生碰撞,造成加里东早期花岗质岩侵入,该事件最可能发生在460~400 Ma。通常认为430~420 Ma是华南地区加里东期造山带构造体制转换的时间(Yao et al, 2012)。综上所述,结合区域地质资料,小横江金矿床内的花岗闪长岩脉很可能形成于同碰撞阶段向后碰撞

伸展阶段转换的环境中。

基于前文所述,官庄金矿整装勘查区内的部分金矿化普遍与加里东期中酸性侵入岩在空间上紧密共生。区内加里东期金矿床的成矿物质和流体来源均显示出明显的岩浆来源信号。例如,团山背和横江冲金矿的成矿流体温度和盐度与典型的岩浆水相似,流体包裹体H-O同位素研究进一步表

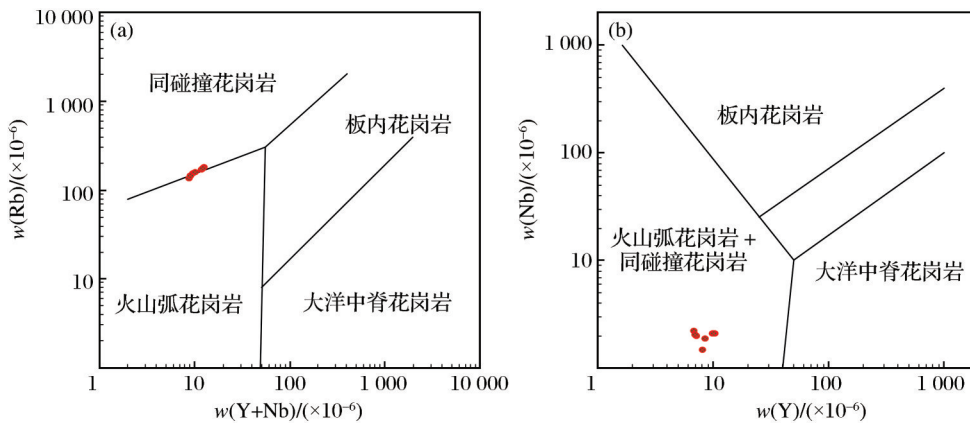


图9 花岗闪长岩的 Y+Nb-Rb(a)和 Y-Nb(b)判别图解(Pearce et al, 1984)

Fig. 9 Discrimination diagram of Y+Nb-Rb(a) and Y-Nb(b) of the granodiorite(Pearce et al, 1984)

明,成矿流体主要为岩浆流体(黄建中等,2020; Wang et al, 2020; 谭仕敏, 2021)。这些研究表明,加里东期的岩浆活动为金矿床的形成提供了成矿物质和流体来源,区内广泛发育的断裂和裂隙为流体迁移提供了有利的通道。综上所述,区域内加里东期的金成矿作用与岩浆活动不仅存在紧密的时空关系,还显示出一定的成因联系,表明岩浆活动在成矿过程中可能起到了关键作用。因此,应加强对加里东期中酸性侵入岩周边区域的找矿勘查工作,以期进一步揭示区域内的金成矿规律和潜在的矿产资源。

## 6 结论

(1)小横江金矿床位于湘东北金成矿带醴陵市官庄金矿整装勘查区内,矿体赋存于新元古界冷家溪群黄浒洞组(Qbh)变质岩中,受近SN向构造控制。在岩体与围岩接触带附近发现金矿化,金品位为 $0.12 \times 10^{-9}$ ~ $0.36 \times 10^{-9}$ ,进一步开展区内花岗闪长岩与金矿化关系研究,对指导下一步增储勘查具有重要意义。

(2)矿区内花岗闪长岩脉锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为 $(437.2 \pm 8.0)$  Ma,表明其侵位于早古生代。结合区域内其他金矿床的成矿年龄数据,认为官庄金矿整装勘查区内存在与加里东期花岗闪长岩相关的金矿化事件。

(3)矿区内的加里东期花岗闪长岩脉总体具有高硅,中等铝含量,富碱,铁、镁、锰和低磷含量的特征,微量和稀土元素特征指示其来源于壳源沉积物,且在形成过程中经历了较高分离结晶作用。

(4)矿区内的加里东期花岗闪长岩脉形成于同碰撞阶段向后碰撞伸展阶段转换的环境中。综合考虑金矿化和岩体的空间共存关系、成岩成矿年代的基本耦合及成矿流体明确的岩浆来源,认为加里东期花岗岩与金矿成矿作用之间具有一定成因联系,应加强对官庄金矿整装勘查区内加里东期中酸性侵入岩周边区域的成矿预测及找矿工作。

**致谢** 野外地质工作得到醴陵市日景矿业发展有限公司辛忠雷教授级高级工程师、唐贤友高级工程师和毛趁龙工程师的大力支持与帮助,在此表示衷心感谢!

## 参考文献 (References):

- Boynton W V, 1984. Chapter 3 cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. *Developments in Geochemistry*, 2: 63-114.
- Castillo P R, 2012. Adakite petrogenesis [J]. *Lithos*, 134: 304-316.
- Chappell B W, 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. *Lithos*, 46(3): 535-551.
- Chappell B W, White A J R, 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 8: 173-174.
- Defant M J, Drummond M S, 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 347(6294): 662-665.
- Deng T, Xu D R, Chi G X, et al, 2017. Geology, geochronology, geochemistry and ore genesis of the Wangu gold deposit in northeastern Hunan Province, Jiangnan Orogen, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 619-637.
- Deng T, Xu D R, Chi G X, et al, 2020. Caledonian (Early Paleozoic) veins overprinted by Yanshanian (Late Mesozoic) gold mineralization in the Jiangnan Orogen: a case study on gold deposits in northeastern Hunan, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 124: 103586.
- Faure M, Shu L S, Wang B, et al, 2009. Intracontinental subduction: a possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China [J]. *Terra Nova*, 21(5): 360-368.
- Li Z X, Li X H, Wartho J A, et al, 2010. Magmatic and metamorphic events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: new age constraints and pressure-temperature conditions [J]. *GSA Bulletin*, 122(5/6): 772-793.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al, 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537-571.
- Madayipu N, Li H, Algeo T J, et al, 2023a. Long-lived Nb-Ta mineralization in Mufushan, NE Hunan, South China: geological, geochemical, and geochronological constraints [J]. *Geoscience Frontiers*, 14(1): 101491.
- Madayipu N, Li H, Elatikpo S M, et al, 2023b. Magmatic-hydrothermal evolution of long-lived Nb-Ta-(Sn) mineralization in Lianyunshan, NE Hunan, South China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 135(9/10): 2691-2709.

- Madayipu N, Li H, Ghaderi M, et al, 2023c. Contrasting Nb-Ta mineralization between the Mufushan and Lianyunshan granites, South China: evidence from whole-rock and zircon geochemistry and geochronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 158: 105487.
- Middlemost E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3/4): 215-224.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G, 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983.
- Rickwood P C, 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247-263.
- Rudnick R, Gao S, 2003. The role of lower crustal recycling in continent formation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 67(18): 403.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345.
- Taylor S R, McLennan S M, 1985. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication.
- Vermeesch P, 2012. On the visualisation of detrital age distributions[J]. *Chemical Geology*, 312: 190-194.
- Wang C, Shao Y J, Zhang X, et al, 2020. Metallogenesis of the Hengjiangchong gold deposit in Jiangnan Orogen, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 118: 103350.
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, et al, 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Precambrian Research*, 159(1/2): 117-131.
- Wang Y J, Zhang F F, Fan W M, et al, 2010. Tectonic setting of the South China Block in the Early Paleozoic: resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology[J]. *Tectonics*, 29(6): TC6020.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W, 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419.
- Wilhem C, Windley B F, Stampfli G M, 2012. The altaids of central Asia: a tectonic and evolutionary innovative review[J]. *Earth-Science Reviews*, 113(3/4): 303-341.
- Xu D R, Deng T, Chi G X, et al, 2017. Gold mineralization in the Jiangnan Orogenic Belt of South China: geological, geochemical and geochronological characteristics, ore deposit-type and geodynamic setting [J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 565-618.
- Yao W H, Li Z X, Li W X, et al, 2012. Post-kinematic lithospheric delamination of the Wuyi-Yunkai orogen in South China: evidence from Ca. 435Ma high-Mg basalts[J]. *Lithos*, 154: 115-129.
- Ye M F, Li X H, Li W X, et al, 2007. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block [J]. *Gondwana Research*, 12(1/2): 144-156.
- Zhang S B, Wu R X, Zheng Y F, 2012a. Neoproterozoic continental accretion in South China: geochemical evidence from the Fuchuan ophiolite in the Jiangnan Orogen [J]. *Precambrian Research*, 220: 45-64.
- Zhang F F, Wang Y J, Zhang A M, et al, 2012b. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Middle Paleozoic (Kwanghsian) massive granites in the eastern South China Block [J]. *Lithos*, 150: 188-208.
- 柏道远, 贾宝华, 刘伟, 等, 2010. 湖南城步火成岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其对江南造山带新元古代构造演化的约束 [J]. *地质学报*, 84(12): 1715-1726.
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Liu Wei, et al, 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the igneous rocks from Chengbu, Hunan: constraint on the Neoproterozoic tectonic evolution of the Jiangnan Orogenic Belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1715-1726.
- 龚建平, 李沐春, 向华, 等, 2017. 湖南省醴陵市官庄矿区金矿地质特征及找矿标志 [J]. *西北地质*, 50(3): 198-204.
- Gong Jianping, Li Muchun, Xiang Hua, et al, 2017. Geological features and prospecting indicators of the Guanzhuang gold deposit in Liling City, Hunan Province [J]. *Northwestern Geology*, 50(3): 198-204.
- 关义立, 袁超, 龙晓平, 等, 2013. 华南地块东部早古生代的陆内造山作用: 来自 I 型花岗岩的启示 [J]. *大地构造与成矿学*, 37(4): 698-720.
- Guan Yili, Yuan Chao, Long Xiaoping, et al, 2013. Early Paleozoic intracontinental orogeny of the eastern South China Block: evidence from I-type granitic plutons in the SE Yangtze Block [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 698-720.
- 韩凤彬, 常亮, 蔡明海, 等, 2010. 湘东北地区金矿成矿时代研究 [J]. *矿床地质*, 29(3): 563-571.
- Han Fengbin, Chang Liang, Cai Minghai, et al, 2010. Ore-forming epoch of gold

- deposits in northeastern Hunan [J]. *Mineral Deposits*, 29 (3): 563-571.
- 胡瑞英,程景平,郭士伦,等,1995. 裂变径迹法在金矿研究中的应用[J]. *地球化学*, 24(2): 188-192. Hu Ruiying, Cheng Jingping, Guo Shilun, et al, 1995. Application of fission track technique to study of gold deposits [J]. *Geochimica*, 24(2): 188-192.
- 黄建中,孙骥,周超,等,2020. 江南造山带(湖南段)金矿成矿规律与资源潜力[J]. *地球学报*, 41(2): 230-252. Huang Jianzhong, Sun Ji, Zhou Chao, et al, 2020. Metallogenic regularity and resource potential of gold deposits of Hunan area in the Jiangnan Orogenic Belt, South China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 230-252.
- 李建华,张岳桥,董树文,等,2015. 湘东宏夏桥和板杉铺岩体 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地球学报*, 36(2): 187-196. Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, et al, 2015. LA-MC-ICPMS zircon U-Pb geochronology of the Hongxiaqiao and Banshanpu granitoids in eastern Hunan Province and its geological implications [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(2): 187-196.
- 李鹏,李建康,裴荣富,等,2017. 幕阜山复式花岗岩体多期次演化与白垩纪稀有金属成矿高峰:年代学依据[J]. *地球科学*, 42(10): 1684-1696. Li Peng, Li Jiankang, Pei Rongfu, et al, 2017. Multistage magmatic evolution and Cretaceous peak metallogenic epochs of Mufushan composite granite mass: constrains from geochronological evidence [J]. *Earth Science*, 42(10): 1684-1696.
- 李鹏,周芳春,李建康,等,2020. 湘东北仁里一传梓源铌钽矿床隐伏花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 44(3): 486-500. Li Peng, Zhou Fangchun, Li Jiankang, et al, 2020. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of the concealed granite of Renli-Chuanziyuan deposit, NE Hunan and geological significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(3): 486-500.
- 李鹏春,陈广浩,许德如,等,2007. 湘东北新元古代过铝质花岗岩的岩石地球化学特征及其成因讨论[J]. *大地构造与成矿学*, 31(1): 126-136. Li Pengchun, Chen Guanghao, Xu Deru, et al, 2007. Petrological and geochemical characteristics and petrogenesis of Neoproterozoic peraluminous granites in northeastern Hunan Province [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 126-136.
- 刘英俊,孙承轅,马东升,1993. 江南金矿及其成矿地球化学背景[M]. 南京:南京大学出版社. Liu Yingjun, Sun Chengyuan, Ma Dongsheng, 1993. Jiangnan gold deposit and its mineralization geochemical background [M]. Nanjing: Nanjing University Press.
- 柳德荣,吴延之,1993. 醴陵市雁林寺金矿床成因探讨[J]. *湖南地质*, 12(4): 247-251. Liu Derong, Wu Yanzhi, 1993. On the genesis of Yanlingshi gold deposit in Liling [J]. *Hunan Geology*, 12(4): 247-251.
- 马东升,刘英俊,1991. 江南金成矿带层控金矿的地球化学特征和成因研究[J]. *中国科学(B辑)*, 21(4): 424-433. Ma Dongsheng, Liu Yingjun, 1991. Study on Geochemical characteristics and genesis of stratabound gold deposits in Jiangnan gold metallogenic belt [J]. *Science in China, Series B*, 21(4): 424-433.
- 毛景文,李红艳,1997. 江南古陆某些金矿床成因讨论[J]. *地球化学*, 26(5): 71-81. Mao Jingwen, Li Hongyan, 1997. Research on genesis of the gold deposits in the Jiangnan terrain [J]. *Geochimica*, 26(5): 71-81.
- 彭建堂,戴塔根,胡瑞忠,1999. 湘西南金矿床成矿物质来源的地球化学证据[J]. *矿物学报*, 19(3): 327-334. Peng Jiantang, Dai Tagen, Hu Ruizhong, 1999. Geochemical evidence for the ore-forming materials of gold deposits, southwestern Hunan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 19(3): 327-334.
- 丘元禧,马文璞,范小林,等,1996. “雪峰古陆”加里东期的构造性质和构造演化[J]. *中国区域地质*, 15(2): 150-160. Qiu Yuanxi, Ma Wenpu, Fan Xiaolin, et al, 1996. Tectonic properties and tectonic evolution of “Xuefeng ancient land” in Caledonian [J]. *Geological Bulletin of China*, 15(2): 150-160.
- 丘元禧,张渝昌,马文璞,1998. 雪峰山陆内造山带的构造特征与演化[J]. *高校地质学报*, 4(4): 432-433. Qiu Yuanxi, Zhang Yuchang, Ma Wenpu, 1998. Tectonics and geological evolution of Xuefeng intra continental orogene, South China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 4(4): 432-433.
- 舒良树,2006. 华南前泥盆纪构造演化:从华夏地块到加里东期造山带[J]. *高校地质学报*, 12(4): 418-431. Shu Liangshu, 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: from cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418-431.
- 苏文超,胡瑞忠,彭建堂,等,2000. 滇黔桂地区卡林型金矿床成矿物质来源的锶同位素证据[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 256-259. Su Wenchao, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, et al, 2000. Strontium isotopic evidence of the source of ore-forming materials in carlin-type gold deposits

- in Yunnan, Guizhou and Guangxi[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 19(4): 256-259.
- 谭华杰, 2022. 江南造山带湘东北地区金矿床成矿作用及成因研究: 以肖家山金矿床为例[D]. 长沙: 中南大学. Tan Huajie, 2022. Gold metallogenesis in northeastern Hunan, Jiangnan Orogen: a case study on the Xiaojiashan gold deposit[D]. Changsha: Central South University.
- 谭仕敏, 2021. 湘东北雁林寺地区金成矿作用研究[D]. 长沙: 中南大学. Tan Shimin, 2021. Study on mineralization of gold deposits in Yanlin Temple Area, Northeastern Hunan Province[D]. Changsha: Central South University.
- 王孝磊, 于津海, 舒洁洁, 等, 2013. 赣中周潭群副变质岩碎屑锆石 U-Pb 年代学[J]. *岩石学报*, 29(3): 801-811. Wang Xiaolei, Yu Jinhai, Shu Xujie, et al, 2013. U-Pb geochronology of detrital zircons from the para-metamorphic rocks of the Zhoutan Group, central Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 801-811.
- 吴华浩, 邵拥军, 刘清泉, 等, 2023. 湘东北正冲金矿床成因: 年代学和硫同位素制约[J]. *黄金科学技术*, 31(2): 190-205. Wu Huahao, Shao Yongjun, Liu Qingquan, et al, 2023. Genesis of the Zhengchong gold deposit in northeast Hunan: constraints from geochronology and in situ sulfur isotope[J]. *Gold Science and Technology*, 31(2): 190-205.
- 徐先兵, 张岳桥, 舒良树, 等, 2009. 闽西南玮埔岩体和赣南菖蒲混合岩锆石 La-ICPMS U-Pb 年代学: 对武夷山加里东运动时代的制约[J]. *地质论评*, 55(2): 277-285. Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Shu Liangshu, et al, 2009. Zircon La-ICPMS U-Pb dating of the Weipu granitic pluton in southwest Fujian and the Changpu migmatite in south Jiangxi: constrains to the timing of Caledonian movement in Wuyi Mountains[J]. *Geological Review*, 55(2): 277-285.
- 许德如, 陈广浩, 夏斌, 等, 2006. 湘东地区板杉埔加里东期埃达克质花岗岩闪长岩的成因及地质意义[J]. *高校地质学报*, 12(4): 507-521. Xu Deru, Chen Guanghao, Xia Bin, et al, 2006. The Caledonian adakite-like granodiorites in Banshanpu area, eastern Hunan Province, South China: petrogenesis and geological significance [J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 507-521.
- 许德如, 邓腾, 董国军, 等, 2017. 湘东北连云山二云母二长花岗岩的年代学和地球化学特征: 对岩浆成因和成矿地球动力学背景的启示[J]. *地学前缘*, 24(2): 104-122. Xu Deru, Deng Teng, Dong Guojun, et al, 2017. Zircon U-Pb geochronological and geochemical characteristics of the Lianyunshan two-mica monzogranites in northeastern Hunan Province: implications for petrogenesis and tectonic setting associated with polymetallic mineralization [J]. *Earth Science Frontiers*, 24(2): 104-122.
- 许德如, 王力, 李鹏春, 等, 2009. 湘东北地区连云山花岗岩的成因及地球动力学暗示[J]. *岩石学报*, 25(5): 1056-1078. Xu Deru, Wang Li, Li Pengchun, et al, 2009. Petrogenesis of the Lianyunshan granites in northeastern Hunan Province, South China, and its geodynamic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1056-1078.
- 于津海, 周新民, O'Reilly Y S, 等, 2005. 南岭东段基底麻粒岩相变质岩的形成时代和原岩性质: 锆石的 U-Pb-Hf 同位素研究[J]. *科学通报*, 50(16): 1758-1767. Yu Jinhai, Zhou Xinmin, O'reilly Y S, et al, 2005. Formation age and protolith properties of basement granulite facies metamorphic rocks in eastern Nanling: U-Pb-Hf isotopic study of zircon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(16): 1758-1767.
- 于玉帅, 戴平云, 张旺驰, 等, 2019. 湘东丫江桥岩体时代与成因: 来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Lu-Hf 同位素制约[J]. *地质学报*, 93(2): 394-413. Yu Yushuai, Dai Pingyun, Zhang Wangchi, et al, 2019. Geochronology and petrogenesis of the Yajiangqiao granitic pluton, eastern Hunan Province: constrains from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemistry and Hf isotope [J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(2): 394-413.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等, 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 43(10): 1553-1582. Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, et al, 2013. Tectonics of South China continent and its implications [J]. *Science China: Earth Sciences*, 43(10): 1553-1582.
- 张颀, 徐德明, 胡俊良, 等, 2017. 湘东北三墩铜铅锌矿区花岗岩的岩石成因: 锆石 U-Pb 测年、岩石地球化学和 Hf 同位素约束[J]. *地质通报*, 36(9): 1591-1600. Zhang Kun, Xu Deming, Hu Junliang, et al, 2017. Petrogenesis of the granites in Sandun area-Constrains from petrochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf Isotope [J]. *Geological Bulletin of China*, 36(9): 1591-1600.
- 张苑, 舒良树, 陈祥云, 2011. 华南早古生代花岗岩的地球化学、年代学及其成因研究: 以赣中南为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 41(8): 1061-1079. Zhang Yuan, Shu Liangshu, Chen Xiangyun, 2011. Geochemistry, geochronology, and petrogenesis of the early Paleozoic granitic plutons in the central-southern Jiangxi Province, China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 41(8): 1061-1079.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生, 2008. 江南造山带是否格林威尔期造山带——关于华南前寒武纪地质的几个问题[J]. *高校地质学报*, 14(1): 64-72. Zhou Jincheng, Wang

Xiaolei, Qiu Jiansheng, 2008. Is the Jiangnan Orogenic Belt a Grenvillian Orogenic Belt: some problems about the

Precambrian geology of South China[J]. Geological Journal of China Universities, 14(1):64-72.

## Study on Geological Characteristics, Geochronology and Petrogenesis of Granodiorite in the Xiaohengjiang Gold Deposit, Northeast Hunan Province

XIANG Hua, LI Shuai, HAO Yugui, TANG Caili, YUAN Mingjun, YIN Hong, YIN Aimin  
*Urban Geological Survey and Monitor Institute of Hunan Province, Changsha 410007, Hunan, China*

**Abstract:** The Xiaohengjiang gold deposit, situated in northeastern Hunan Province, represents a significant recent discovery within the Guanzhuang gold deposit comprehensive exploration area in Liling City, Hunan Province. This deposit encompasses the Tieshijian and Taohua ore sections and is hosted within the Huanghudong Formation of the Lengjiaxi Group, part of the Neoproterozoic Qingbaikou Formation. Its formation and spatial distribution are predominantly influenced by nearly north-south-oriented fault structures. The primary ore types present include fractured-altered slate and sulfide quartz vein gold ores. Currently, the deposit is classified as having a medium resource scale, with substantial potential for further exploration and resource expansion. Despite its geological importance, there has been limited research investigating the relationship between acidic magmatic rocks and gold mineralization in this region. To address this research gap, the present study concentrates on the geochronology, petrogenesis, and tectonic implications of the granodiorite veins exposed within the mining area. Utilizing zircon LA-ICP-MS U-Pb dating techniques, the emplacement age of the granodiorite veins was determined to be in the Early Paleozoic [(437.2±8.0)Ma]. This result suggests that the gold mineralization events in the region are temporally linked to Caledonian magmatic activities, indicating an association with regional tectonomagmatic processes. The granodiorite veins exhibit high silicon content, moderate aluminum levels, and are enriched in alkali elements, while displaying low concentrations of iron, magnesium, manganese, and phosphorus, characteristics typical of S-type granites. The rare earth element (REE) distribution patterns demonstrate a rightward decline, accompanied by a weak negative Eu anomaly and significant enrichment in large-ion lithophile elements (LILEs) such as Rb, Th, U, and La. In contrast, high-field-strength elements (HFSEs), including Nb, Sr, P, and Ti, show notable depletion. These geochemical attributes suggest that the granodiorite veins originated from crustal sedimentary sources through partial melting and underwent substantial fractional crystallization during their formation. Furthermore, the granodiorite veins are postulated to have formed within a tectonic environment transitioning from a syn-collisional to a post-collisional extensional regime. This transitional setting facilitated the interaction between tectonic and magmatic processes, thereby contributing to gold mineralization. A comprehensive analysis confirms a spatial and temporal correlation between Caledonian magmatic activities and gold mineralization events. Based on these findings, it is recommended that future exploration efforts concentrate on areas surrounding Caledonian intrusive rocks. These areas may possess untapped mineralization potential, offering opportunities for the discovery of new gold resources. This approach not only enhances the understanding of mineralization processes but also provides practical guidance for regional gold exploration and resource development strategies.

**Key words:** granodiorite; geochemistry characterization; zircon U-Pb age; Caledonian; Xiaohengjiang gold deposit; Northeastern Hunan Province