

江西德兴斑岩铜矿石英闪长玢岩成因及 成矿学意义

鲍波^{1,2}, 姜军胜^{1,2}, 于玉帅^{1,2}, 秦拯纬^{1,2}, 郑忠超³, 柳潇², 陕亮^{1,2},
董宜勇⁴, 李福林²

(1. 中国地质调查局 花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质调查局 武汉地质调查中心
(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205; 3. 江西省地质局 第八地质大队, 江西 上饶 334000;
4. 江西省地质局 第二地质大队, 江西 九江 332000)

摘要: 为探究石英闪长玢岩成因及幔源基性岩浆对斑岩铜矿的贡献, 本文选取德兴矿床石英闪长玢岩开展了锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素和全岩地球化学研究。获得石英闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 169 Ma, 与成矿花岗闪长斑岩侵位时间一致, 岩体为中侏罗世岩浆活动的产物。石英闪长玢岩具有低的 SiO₂ (58.41%~63.12%) 和 K₂O (1.68%~2.94%) 含量及 A/CNK 值 (0.85~1.04), 富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 和重稀土元素, 属于钙碱性到高钾钙碱性系列岩石。具有相对亏损的锆石 Hf 同位素组成, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 2.20 \sim 7.93$ (最大值 7.93), 指示其源区为岩石圈地幔。锆石稀土元素配分模式图显示出明显的正 Ce 异常, 岩浆氧逸度 ($\lg f_{\text{O}_2}$) 为 -20.05~-6.66, 达到磁铁矿-赤铁矿氧逸度等级, 指示石英闪长玢岩结晶自高氧逸度岩浆。全岩地球化学特征显示, 德兴石英闪长玢岩与成矿花岗闪长斑岩及其暗色包体符合岩浆混合的演化趋势, 说明成矿花岗闪长斑岩可能是中侏罗世幔源基性岩浆和地壳酸性岩浆大规模混合作用的产物, 并且石英闪长玢岩代表了岩浆混合过程中的幔源基性端员。结合前人研究成果, 认为在中侏罗世伸展构造背景下, 软流圈物质上涌导致新元古代受交代的岩石圈地幔部分熔融形成幔源基性岩浆, 基性岩浆的底侵作用诱发下地壳物质熔融并与之发生一定程度的岩浆混合作用, 形成了花岗闪长斑岩的母岩浆。高氧逸度幔源岩浆的加入可抑制斑岩体系硫化物的过早饱和, 同时为德兴矿床注入了成矿所需的部分挥发分和金属元素。

关键词: 石英闪长玢岩; 壳幔岩浆混合; 岩石成因; 岩浆氧逸度; 德兴斑岩铜矿

中图分类号: P588.13⁺4; P611

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)04-0483-19

Petrogenesis and metallogeny significance of quartz diorite porphyries from the Dexing porphyry Cu deposit, Jiangxi Province

BAO Bo^{1,2}, JIANG Jun-sheng^{1,2}, YU Yu-shuai^{1,2}, QIN Zheng-wei^{1,2}, ZHENG Zhong-chao³, LIU Xiao²,
SHAN Liang^{1,2}, DONG Yi-yong⁴ and LI Fu-lin²

(1. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Wuhan 430205, China;
2. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, China; 3. The
Eighth Geological Team of Jiangxi Geological Bureau, Shangrao 334000, China; 4. The Second Geological Team of Jiangxi Geological
Bureau, Jiujiang 332000, China)

收稿日期: 2022-12-20; 接受日期: 2023-05-17; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心开放基金项目 (PMGR202015); 国家自然科学基金项目 (41802100); 国家重点
研发计划项目 (2018YFA0702700); 中国地质调查局项目 (DD20221689, DD20230050); 中国地质调查局武汉地质调查中心青
年人才项目 (QL2022-03)

作者简介: 鲍波 (1988-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地质调查与成矿作用地球化学研究工作, E-mail: baobo@mail.cgs.gov.
cn; 通讯作者: 于玉帅 (1985-), 男, 高级工程师, 主要从事地质调查及矿床学研究工作, E-mail: shuaiyuyu1103@163.com。

Abstract: In order to explore the petrogenesis of quartz diorite porphyry and the ore-forming contribution of mantle-derived basic magma, this paper present LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, Hf isotope and whole rock geochemical study for quartz diorite porphyries from Dexing porphyry Cu deposit. The LA-ICP-MS zircon U-Pb age of quartz diorite porphyries obtained is 169 Ma, in accordance with that of ore-forming granodiorite porphyries, indicating that they were emplaced during the middle Jurassic. The quartz diorite porphyries are characterized by low SiO₂ (58.41%~63.12%), K₂O (1.68%~2.94%) contents and A/CNK values(0.85~1.04), belonging to the calc-alkaline to high-potassium calc-alkaline rocks. They are enriched in large ion lithophile elements and light rare earth elements but depleted in high field strength elements Nb, Ta, Ti, and heavy rare earth elements. The Hf isotope composition of zircon with relative depletion, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 2.20 \sim 7.93$ (maximum 7.93), indicating that they were crystallized from lithospheric mantle-derived magmas. The zircon REE distribution pattern diagram shows an obvious positive Ce anomaly, and the magmatic oxygen fugacity ($\lg f_{\text{O}_2}$) varies from -20.05 to -6.66 , reaching the magnetite to hematite oxygen fugacity buffer, indicating that they were crystallized from magma with high oxygen fugacity. Geochemical results show that quartz diorite porphyries, granodiorite porphyries (and the enclosed enclaves) conform to the evolution trend of magma mixing, which indicates that the ore-forming granodiorite porphyry may be the product of large-scale mixing of mantle-derived basic magma and crust-derived acidic magma in the Middle Jurassic, and the quartz diorite porphyry represents the mantle-derived basic end member in the process of magma mixing. Combined with previous research results, it is believed that quartz diorite porphyries in the Dexing deposit were generated by melting of subduction-modified lithospheric mantle, which was triggered by upwelling of the asthenospheric mantle related to the extensional setting during the middle Jurassic in South China. Underplating of the mantle-derived basic magmas could have provided heat for melting of the lower crust and subsequently mixed with the crust-derived acidic magmas, which generated the parent magmas of ore-forming granodiorite porphyries. In addition, the magmatic system of quartz diorite porphyry was highly oxidized, which was favorable for preventing the early sulfide saturation and contributing volatiles and metals to the Dexing ore-forming systems.

Key words: quartz diorite porphyry; magma mixing; petrogenesis; magmatic oxygen fugacity; Dexing porphyry Cu deposit

Fund support: Open Fund of the Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey (PMGR202015); National Natural Science Foundation of China (41802100); National Key Research and Development Program of China (2018YFA0702700); Projects of China Geological Survey (DD20221689, DD20230050); Youth Talents Project of Wuhan Center, China Geological Survey (QL2022-03)

斑岩型铜矿床供给世界将近 3/4 的 Cu、1/2 的 Mo、1/5 的 Au 和大部分的 Re 等金属 (Silitoe, 2010)。斑岩型铜矿床通常形成于弧环境 (Cooke *et al.*, 2005; Silitoe, 2010; 高俊等, 2019), 也可以形成于后碰撞 (Yang *et al.*, 2009; 王瑞等, 2020) 和陆内 (Liu *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015; 侯增谦等, 2020) 等非弧环境。数值模拟研究认为, 常见的钙碱性岩浆和“普通”体积的岩浆房演化足够形成具有工业价值的斑岩型矿床 (Cline and Bodnar, 1991)。然而质量平衡计算表明, 长英质岩浆房形成超大型斑岩矿床具有明显的挥发分质量不守恒问题, 这种不守恒现象对于 S 组分来说尤其明显 (Hattori and Keith, 2001)。因此, 研究幔源中基性岩浆岩成因以

及中基性岩浆与斑岩铜矿的关系成为近年来斑岩铜矿研究的重要方向之一 (Yang *et al.*, 2015; Cao *et al.*, 2018, 2022; Cheng *et al.*, 2018)。

德兴矿床是中国东部最大的斑岩型铜钼金矿床, 由铜厂、富家坞、朱砂红 3 个独立的矿体组成。多年来, 研究人员已就德兴矿床成矿花岗闪长斑岩开展了大量的定年和地球化学工作 (Wang *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2012; Hou *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015), 然而成矿斑岩成因和形成的动力学背景仍然存在显著争议。部分学者认为俯冲板片的熔融产生德兴埃达克质成矿斑岩的原始岩浆 (Zhou *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013); 还有学者认为德兴成矿岩浆产

于陆内伸展构造背景,新元古代残余弧或新生下地壳熔融形成德兴成矿斑岩的原始岩浆(Liu *et al.*, 2012; Hou *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015); Wang 等(2006)则认为软流圈物质上涌导致的拆沉下地壳部分熔融形成德兴成矿斑岩的原始岩浆。

除花岗闪长斑岩外,德兴矿床还发育与成矿斑岩近同期的石英闪长玢岩,目前仅有少量研究涉及石英闪长玢岩成因(Wang *et al.*, 2020),有必要进一步研究石英闪长玢岩原始岩浆的形成和演化,以期更好地理解岩浆过程对于斑岩铜矿形成的控制作用。因此,本文以石英闪长玢岩为研究对象,开展了全岩地球化学、锆石 U-Pb 定年以及 Lu-Hf 同位素测试,进而探究德兴石英闪长玢岩成因并评估幔源中

基性岩浆对于斑岩铜矿形成的重要贡献。

1 地质背景及样品描述

1.1 区域地质背景

德兴斑岩铜矿构造上位于江南造山带东段。前人研究提出,扬子地块和华夏地块在新元古代碰撞拼合形成现今的华南(图1)(在下扬子地区,江绍断裂带被认为是扬子地块和华夏地块的构造分界线),这一碰撞事件导致北东向江南造山带以及蛇绿混杂岩带的形成(Li and McCulloch, 1996; 王孝磊等, 2017)。华夏地块发育古元古代-中元古代的结晶基底,扬子板块的结晶基底为晚太古代-元古宙的老地

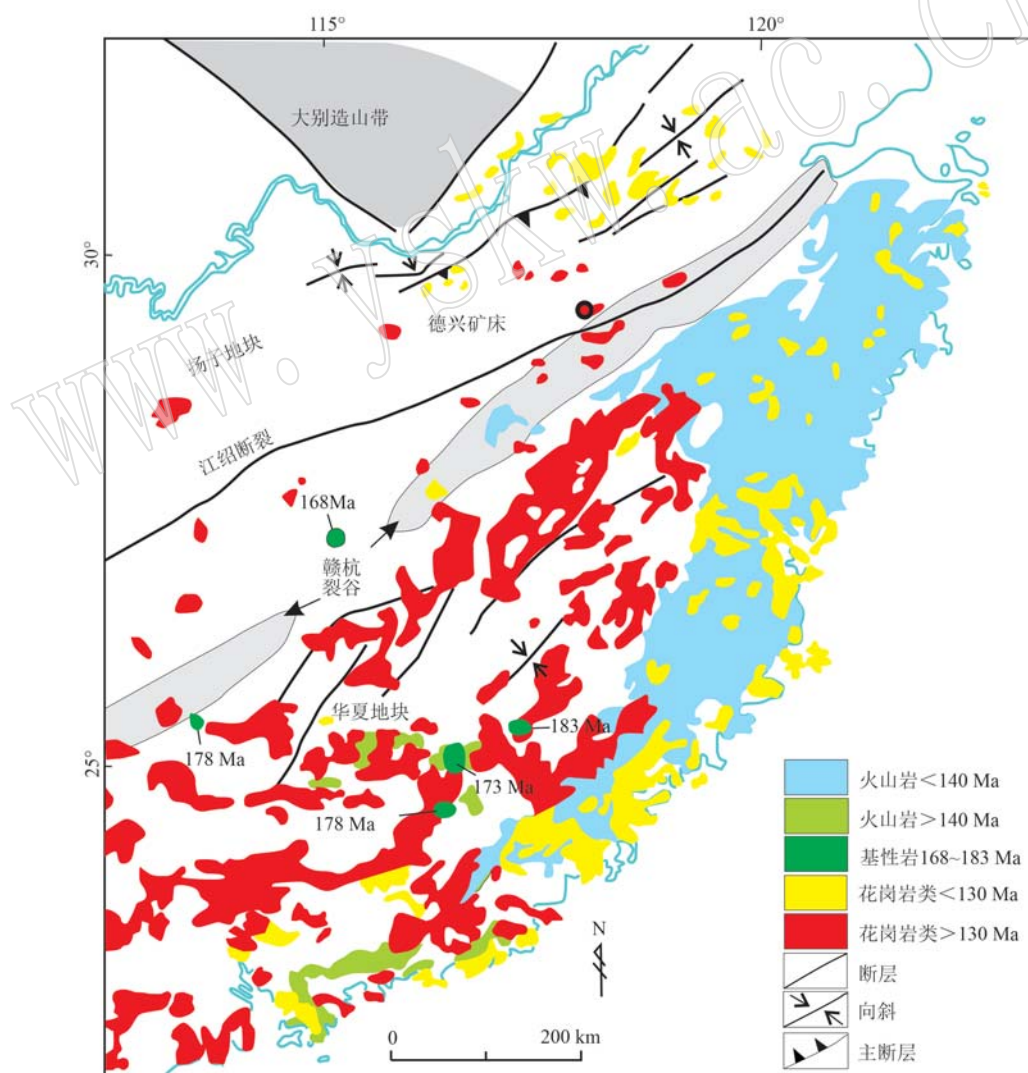


图1 华南地质简图(据 Hou *et al.*, 2013)

Fig. 1 Simplified geological map of South China (after Hou *et al.*, 2013)

层(Chen and Jahn, 1998)。此外,华南地区发育大量的新元古代弧火山岩地层,如位于赣东北地区的漆工群,主要岩性为细碧岩、角斑岩和其他火山碎屑岩(Liu *et al.*, 2012)。

中生代,中国东南部发生一系列广泛而强烈的岩浆活动。其中,183~90 Ma 范围内的岩浆作用在华南广泛发育,主要集中在 183~168、160~130 和 130~90 Ma 这 3 个岩浆峰期。183~168 Ma 的岩浆岩主要为碱性玄武岩、拉斑玄武岩、双峰式火山岩和 A 型花岗岩等。160~130 Ma 的岩浆岩主要为与 W-Mo(毛景文等, 2004)和 Sn-W、Nb-Ta 矿化有关的花岗岩类(陆建军等, 2022)。华南最强烈的岩浆活动发生于 130~90 Ma,形成沿海岸带分布的具有弧岩

浆特征的火山-侵入杂岩带(Hou *et al.*, 2013)。此外,该岩浆峰期在长江中下游成矿带也产出有大量的花岗质侵入体(Wang *et al.*, 2014)。

1.2 矿床地质特征

德兴矿区出露的地层为中新元古代双桥山群千枚岩和变质沉凝灰岩(图 2)。根据断裂组合特征及先后顺序,矿区断裂可分为北东向、北西向和北北东向 3 组。德兴矿床成矿花岗闪长斑岩以岩株的形式侵入到双桥山群中,共发育 3 个矿化斑岩中心,从北西到南东分别为朱砂红、铜厂和富家坞,这 3 个斑岩体分别形成了 3 个相对独立的矿体。此外,德兴矿床还产出小体积的石英闪长玢岩和辉绿岩,指示存在中基性岩浆活动。

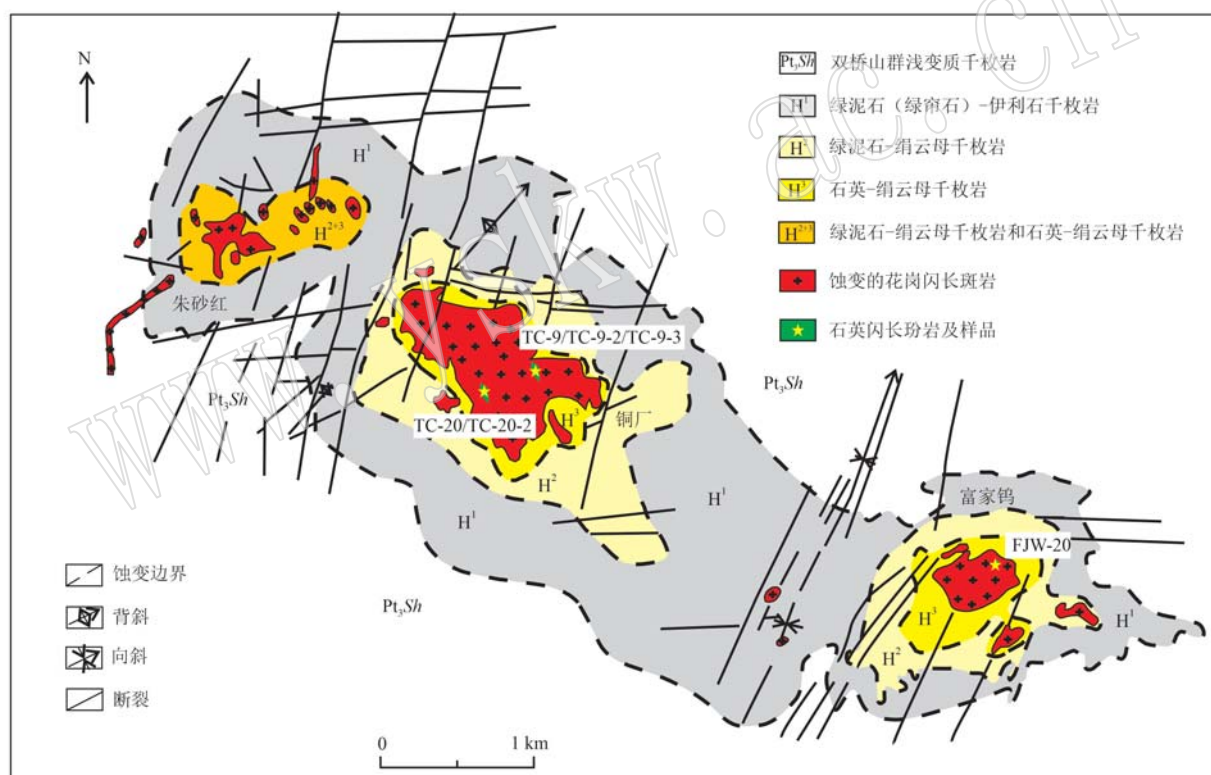


图 2 德兴斑岩矿床地质简图(据 Wang *et al.*, 2020)

Fig. 2 Simplified geological map of Dexing porphyry deposit (after Wang *et al.*, 2020)

德兴矿床 3 个独立矿区具有相似的蚀变类型和蚀变分带特征,总体上表现为以接触带为中心的蚀变分带模式,整体具有一定的对称性(Zhou *et al.*, 2012)。蚀变过程可划分为 3 个阶段:第 1 阶段以钾化为主,蚀变作用主要发生在成矿岩体内部,蚀变矿物以钾长石和石英为主;第 2 阶段以绢云母化为主,位于钾化蚀变带的周围并且可以延伸到围岩之中,蚀变矿物以石英、绢云母、绿泥石为主;第 3 阶段为

绿泥石-伊利石化蚀变阶段,形成绿泥石、绿帘石、伊利石、方解石等蚀变矿物。

德兴矿床 3 个独立的矿区具有相似的矿化特征,主要矿体均产在斑岩体顶部的内外接触带,呈空心筒状套合在斑岩体之上,平面上呈环形。正在开采的铜厂、富家坞矿区显示,约有 2/3 的矿体产于外接触带的变质岩中,约有 1/3 的矿体产于斑岩体内。铜厂矿区以铜、金矿化为主,富家坞以铜、钼矿化为

主,朱砂红则为铜、钼、金矿化。矿石构造以细脉、浸染状及其细脉-浸染状复合构造为主,矿石成分简单,主要矿石矿物有黄铜矿、辉钼矿、斑铜矿等。

1.3 样品描述

石英闪长玢岩在德兴矿床铜厂、富家坞、朱砂红矿区均有产出,因矿山露天爆破开采缘故,未观察到石英闪长玢岩体的野外产状。本次研究在铜厂和富家坞矿区共采集蚀变和风化程度较弱的样品6件,用于锆石 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素分析以及岩石地球化学测试,采样位置见图2。

石英闪长玢岩,深灰色,斑状结构,块状构造(图3a)。斑晶主要由斜长石(20%)、角闪石(10%)、石英(4%)和黑云母(2%)等组成。其中,斜长石斑晶

多呈半自形到自形板状,聚片双晶发育,不同斜长石双晶纹宽度差异明显。此外,斜长石还发育明显的成分环带以及不同程度的绢云母化蚀变(图3b)。黑云母斑晶,片状,发育一组极完全解理(图3b)。角闪石斑晶呈半自形到自形柱状,绿泥石化蚀变强烈(图3c)。石英斑晶主要呈半自形-他形,多发育熔蚀结构(图3d)。基质为隐晶质,约占60%,主要由细小的长英质矿物组成,长石矿物多发生绢云母化蚀变,含少量的黑云母和角闪石等矿物。此外,德兴矿床成矿花岗闪长斑岩发育暗色微粒包体(图3e),石英闪长玢岩发育具有核边结构的磷灰石单矿物(图3f)。

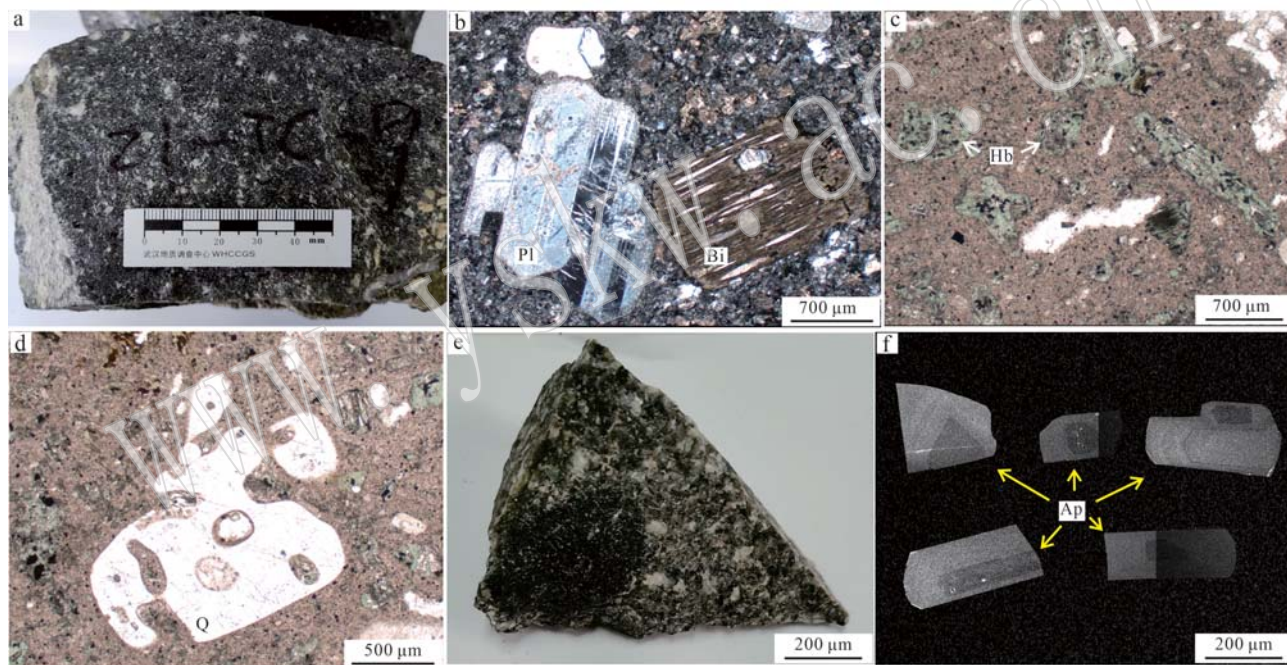


图3 德兴矿床岩体手标本及显微镜下照片

Fig. 3 The hand specimens and photomicrographs of plutons from Dexing deposit

a—石英闪长玢岩; b—斜长石(Pl)和黑云母(Bi)斑晶; c—绿泥石化角闪石(Hb); d—熔蚀结构石英(Q)斑晶; e—花岗闪长斑岩及暗色包体; f—核边结构磷灰石(Ap)

a—quartz diorite porphyry; b—plagioclase(Pl) and biotite(Bi) phenocrysts; c—hornblende(Hb); d—resorption texture of quartz phenocryst(Q); e—granodiorite porphyry and enclosed mafic enclave; f—core-rim zonation of apatite(Ap)

2 分析测试方法

2.1 锆石微量元素、U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素测试

经重磁方法分选出锆石后,在双目镜下挑选晶型较好且透明的锆石进行单矿物制靶,研磨抛光至锆石近中心部位。锆石的透射光、反射光以及阴极

发光拍照在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,其中阴极发光拍照使用配备阴极荧光探头 JSM-IT300 的扫描电镜完成。

锆石微量元素、U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素测试在自然资源部中南矿产资源检测中心完成。其中,锆石 U-Pb 定年和微量元素测试使用的仪器为激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS),激光剥蚀系统

为 RESolution 193nm ArF 准分子激光器, ICP-MS 型号为 icapQ。本次分析的激光束斑和频率分别为 29 μm 和 6~8 Hz, 剥蚀时间为 45 s。采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST 610 作外标分别进行同位素和微量元素的分馏校正。使用软件 ICPMSData-Cal 10.9 完成分析数据的离线处理 (Liu *et al.*, 2008)。锆石加权平均年龄计算和 U-Pb 年龄谐和图绘制使用 ISOPLLOT 软件完成 (Ludwig, 2003; 路远发等, 2023)。

锆石原位微区 Lu-Hf 同位素测试使用激光剥蚀多接收器等离子体质谱仪 (LA-MC-ICP-MS) 完成。激光剥蚀系统为 RESolution 193 nm ArF 准分子激光器, MC-ICP-MS 为 Neptune Plus。锆石 Hf 同位素测试点选择锆石 U-Pb 定年测试点位置或其附近。本次分析的激光束斑和频率分别为 43 μm 和 6~8 Hz, 激光剥蚀时间为 60 s。采用 Penglai 和 Plesovice 作为标样。采用 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 0.796\,218$ (Fisher *et al.*, 2011) 来扣除 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同量异位干扰; 采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.026\,56$ (Blichert-Toft *et al.*, 1997) 来扣除 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同量异位干扰。使用软件 ICPMSDataCal 10.9 完成分析数据的离线处理 (Liu *et al.*, 2010)。

2.2 岩石地球化学测试

在薄片岩相学鉴定的基础上, 选取新鲜岩石样品, 切除裂隙部分和风化表面, 粉碎至 200 目, 在武汉上谱分析科技有限责任公司进行主量元素和微量元素的分析测试。将加有助熔剂 (四硼酸锂、偏硼酸锂、氟化锂) 和氧化剂 (硝酸铵) 的样品在高温下进行熔融并制作玻璃熔片, 使用 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 进行主量元素测试, 主量元素测试相对标准偏差小于 2%, 烧失量通过减重法进行测定。微量元素采用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 进行测试。称取 50 mg 样品于 Teflon 溶样弹中, 然后用硝酸、氢氟酸等分 3 个阶段进行消解, 处理后的溶液用硝酸稀释至 100 g 并用 ICP-MS 进行测试。微量元素分析误差小于 10%。

3 分析测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

石英闪长玢岩锆石为无色-浅灰色, 以自形长柱状为主, 长轴介于 100~250 μm 之间。阴极发光图像显示大部分锆石发育明显的震荡环带, 对发育环

带结构的锆石颗粒进行定年测试工作, 结果见表 1。锆石 Th、U 含量分别介于 $152 \times 10^{-6} \sim 870 \times 10^{-6}$ 和 $348 \times 10^{-6} \sim 964 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值为 0.38~0.90, 显示其为岩浆成因。FJW-20 样品 28 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $172 \pm 2 \sim 167 \pm 2$ Ma 之间, 加权平均年龄为 169 ± 1 Ma。TC-20 样品 30 个分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $172 \pm 2 \sim 166 \pm 1$ Ma, 加权平均年龄为 168 ± 1 Ma (图 4)。锆石 U-Pb 定年结果显示石英闪长玢岩为中侏罗世岩浆活动的产物。

3.2 锆石微量元素含量和岩浆氧逸度

锆石微量元素含量和岩浆氧逸度系列参数计算结果分别见表 2 和表 3。使用 Geo- f_{O_2} 软件对全岩和相应锆石的微量元素含量进行计算, 求得岩浆氧逸度、锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值以及锆石饱和温度等系列参数 (Li *et al.*, 2019)。使用锆石钛温度计进行锆石饱和温度的计算 (Ferry and Watson, 2007)。在石英闪长玢岩中未发现金红石, 因此设定 SiO_2 和 TiO_2 活度分别为 1 和 0.7。根据 Ce^{4+} 、 Ce^{3+} 锆石-熔体分配的晶格应变模型进行锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值计算 (Ballard *et al.*, 2002)。根据锆石 Ce 异常和锆石结晶温度进行岩浆氧逸度计算 (Trail *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2019)。锆石稀土元素配分模式图显示轻稀土元素亏损、重稀土元素富集, 并且具有非常明显的正 Ce 异常 (图 5)。计算获得的锆石结晶温度为 $552 \sim 765^\circ\text{C}$ (平均值为 $665 \pm 49^\circ\text{C}$); $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值为 76.1~507, 平均值为 269; $\lg f_{\text{O}_2}$ 为 $-20.1 \sim -6.66$, 中位数为 -11.6 。

3.3 岩石主、微量元素

德兴石英闪长玢岩主微量元素原始测试结果见表 4, 在表述和作图过程中主量元素均采用烧失量校正后的结果。石英闪长玢岩 SiO_2 含量为 58.41%~63.12%, 具有高的 TFe_2O_3 (6.11%~8.54%) 和 MgO (3.71%~4.87%) 含量以及高的 $\text{Mg}^\#$ 值 (50.3~56.8)。样品 $\text{K}_2\text{O} = 1.68\% \sim 2.94\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 5.41\% \sim 6.36\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.64\% \sim 16.30\%$, $\text{CaO} = 3.87\% \sim 5.61\%$, A/CNK 值较低 (0.85~1.04)。主量元素特征指示石英闪长玢岩为安山质组成, 具有钙碱性-高钾钙碱性及准铝质特征 (图 6)。

石英闪长玢岩稀土元素总量为 $106 \times 10^{-6} \sim 162 \times 10^{-6}$ 。稀土元素球粒陨石标准化图呈现明显的右倾轻稀土元素富集的配分模式 (图 7a), 样品的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 11.4 \sim 18.3$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 9.17 \sim 12.8$ 。Eu/Eu* = 0.57~1.10, 多数样品具有中等-弱的负 Eu 异常, 指示源区经历了不同程度的斜长石分离结

表 1 德兴石英闪长玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results of Dexing quartz diorite porphyry

分析点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						同位素年龄			
	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
铜厂													
TC-20-1	162	430	0.38	0.050 6	0.001 0	0.181 2	0.003 4	0.026 0	0.000 3	169	3	166	2
TC-20-2	269	419	0.64	0.050 2	0.000 9	0.183 4	0.003 7	0.026 5	0.000 3	171	3	169	2
TC-20-3	354	715	0.50	0.048 9	0.000 8	0.176 7	0.002 8	0.026 2	0.000 3	165	2	167	2
TC-20-4	317	481	0.66	0.049 9	0.001 0	0.184 1	0.004 0	0.026 7	0.000 3	172	3	170	2
TC-20-5	870	964	0.90	0.049 6	0.000 7	0.180 0	0.002 4	0.026 3	0.000 2	168	2	167	1
TC-20-6	705	826	0.85	0.049 7	0.000 7	0.181 5	0.002 3	0.026 6	0.000 3	169	2	169	2
TC-20-7	514	633	0.81	0.048 5	0.000 8	0.176 3	0.003 2	0.026 3	0.000 3	165	3	168	2
TC-20-8	303	544	0.56	0.049 8	0.000 9	0.179 3	0.003 6	0.026 1	0.000 3	167	3	166	2
TC-20-9	528	682	0.77	0.049 2	0.000 9	0.181 2	0.003 2	0.026 7	0.000 3	169	3	170	2
TC-20-10	240	383	0.63	0.049 6	0.001 2	0.184 6	0.004 5	0.027 0	0.000 3	172	4	172	2
TC-20-11	456	630	0.72	0.050 1	0.000 9	0.183 6	0.003 2	0.026 6	0.000 3	171	3	169	2
TC-20-12	572	702	0.81	0.049 1	0.000 8	0.179 4	0.003 0	0.026 5	0.000 3	168	3	169	2
TC-20-13	442	561	0.79	0.049 5	0.000 8	0.185 0	0.003 2	0.027 1	0.000 3	172	3	172	2
TC-20-14	326	467	0.70	0.052 2	0.001 1	0.189 4	0.004 0	0.026 3	0.000 3	176	3	168	2
TC-20-15	396	548	0.72	0.049 7	0.001 0	0.181 8	0.003 7	0.026 6	0.000 3	170	3	169	2
TC-20-16	400	610	0.66	0.050 2	0.000 8	0.182 6	0.003 1	0.026 4	0.000 3	170	3	168	2
TC-20-18	262	423	0.62	0.050 0	0.000 9	0.184 7	0.003 4	0.026 8	0.000 3	172	3	171	2
TC-20-19	217	508	0.43	0.050 1	0.001 0	0.182 1	0.003 6	0.026 4	0.000 3	170	3	168	2
TC-20-20	192	398	0.48	0.050 7	0.001 1	0.187 4	0.004 0	0.026 8	0.000 2	174	3	171	2
TC-20-21	458	679	0.67	0.049 5	0.000 7	0.179 7	0.002 9	0.026 4	0.000 3	168	3	168	2
TC-20-22	357	538	0.66	0.050 0	0.000 8	0.180 9	0.003 2	0.026 3	0.000 3	169	3	167	2
TC-20-23	476	677	0.70	0.050 0	0.000 7	0.181 2	0.002 8	0.026 3	0.000 2	169	2	167	2
TC-20-24	431	625	0.69	0.050 1	0.000 8	0.180 8	0.003 2	0.026 2	0.000 2	169	3	166	1
TC-20-26	363	582	0.62	0.050 2	0.000 7	0.182 2	0.002 7	0.026 3	0.000 2	170	2	168	2
TC-20-27	574	689	0.83	0.049 3	0.000 8	0.181 4	0.003 0	0.026 7	0.000 3	169	3	170	2
TC-20-28	488	691	0.71	0.049 1	0.000 8	0.177 0	0.003 0	0.026 1	0.000 2	166	3	166	1
TC-20-29	440	718	0.61	0.049 1	0.000 8	0.180 7	0.003 0	0.026 7	0.000 3	169	3	170	2
TC-20-30	273	504	0.54	0.048 6	0.000 9	0.178 0	0.003 1	0.026 6	0.000 3	166	3	169	2
TC-20-31	414	746	0.56	0.050 1	0.000 7	0.184 5	0.002 6	0.026 7	0.000 2	172	2	170	2
TC-20-32	358	611	0.59	0.049 4	0.000 8	0.180 3	0.003 3	0.026 5	0.000 3	168	3	168	2
富家坞													
FJW-20-1	358	729	0.49	0.048 8	0.000 7	0.179 6	0.003 0	0.026 6	0.000 3	168	3	170	2
FJW-20-2	258	540	0.48	0.048 7	0.001 0	0.179 8	0.003 4	0.026 9	0.000 3	168	3	171	2
FJW-20-4	178	408	0.43	0.050 2	0.000 9	0.184 9	0.003 7	0.026 7	0.000 2	172	3	170	2
FJW-20-5	252	568	0.44	0.046 8	0.000 8	0.169 8	0.002 9	0.026 3	0.000 3	159	3	167	2
FJW-20-6	208	467	0.45	0.049 7	0.000 9	0.182 2	0.003 6	0.026 6	0.000 3	170	3	169	2
FJW-20-7	691	960	0.72	0.048 6	0.000 7	0.178 5	0.002 5	0.026 6	0.000 3	167	2	169	2
FJW-20-8	155	363	0.43	0.050 9	0.001 0	0.187 2	0.003 8	0.026 7	0.000 3	174	3	170	2
FJW-20-9	528	848	0.62	0.050 4	0.000 7	0.184 6	0.002 9	0.026 5	0.000 3	172	3	169	2
FJW-20-10	251	574	0.44	0.049 1	0.000 7	0.182 9	0.002 9	0.027 0	0.000 3	171	3	172	2
FJW-20-11	234	545	0.43	0.048 5	0.000 8	0.177 8	0.003 0	0.026 6	0.000 3	166	3	169	2
FJW-20-12	267	496	0.54	0.051 1	0.000 8	0.188 6	0.003 4	0.026 7	0.000 3	175	3	170	2
FJW-20-13	189	416	0.46	0.052 0	0.001 0	0.191 8	0.003 4	0.026 8	0.000 3	178	3	171	2
FJW-20-14	267	562	0.48	0.049 2	0.000 8	0.182 3	0.003 4	0.026 8	0.000 3	170	3	171	2
FJW-20-15	255	543	0.47	0.049 6	0.001 0	0.184 4	0.003 8	0.027 0	0.000 3	172	3	172	2
FJW-20-16	430	907	0.47	0.049 9	0.000 7	0.181 9	0.002 8	0.026 4	0.000 3	170	2	168	2
FJW-20-17	431	719	0.60	0.050 2	0.000 8	0.183 6	0.002 7	0.026 5	0.000 2	171	2	169	2
FJW-20-18	450	718	0.63	0.050 1	0.000 8	0.183 4	0.003 1	0.026 5	0.000 2	171	3	169	1
FJW-20-19	348	632	0.55	0.050 6	0.000 8	0.186 6	0.003 4	0.026 7	0.000 3	174	3	170	2
FJW-20-20	254	532	0.48	0.048 7	0.000 9	0.179 7	0.003 7	0.026 7	0.000 3	168	3	170	2
FJW-20-21	296	637	0.46	0.049 4	0.001 0	0.182 5	0.003 7	0.026 8	0.000 3	170	3	171	2
FJW-20-22	283	560	0.51	0.050 5	0.000 8	0.187 2	0.003 4	0.026 9	0.000 3	174	3	171	2
FJW-20-24	498	783	0.64	0.051 0	0.000 7	0.185 5	0.003 0	0.026 4	0.000 3	173	3	168	2
FJW-20-25	224	494	0.45	0.050 7	0.001 0	0.186 0	0.003 6	0.026 6	0.000 2	173	3	169	2
FJW-20-26	221	480	0.46	0.050 8	0.000 9	0.186 0	0.003 2	0.026 6	0.000 3	173	3	169	2
FJW-20-27	152	348	0.44	0.049 4	0.000 9	0.178 8	0.003 1	0.026 3	0.000 3	167	3	167	2
FJW-20-28	299	646	0.46	0.050 6	0.000 8	0.183 0	0.002 9	0.026 2	0.000 3	171	3	167	2
FJW-20-29	194	443	0.44	0.049 5	0.000 8	0.180 1	0.003 2	0.026 4	0.000 3	168	3	168	2
FJW-20-30	232	530	0.44	0.051 2	0.000 8	0.186 1	0.003 1	0.026 4	0.000 2	173	3	168	2

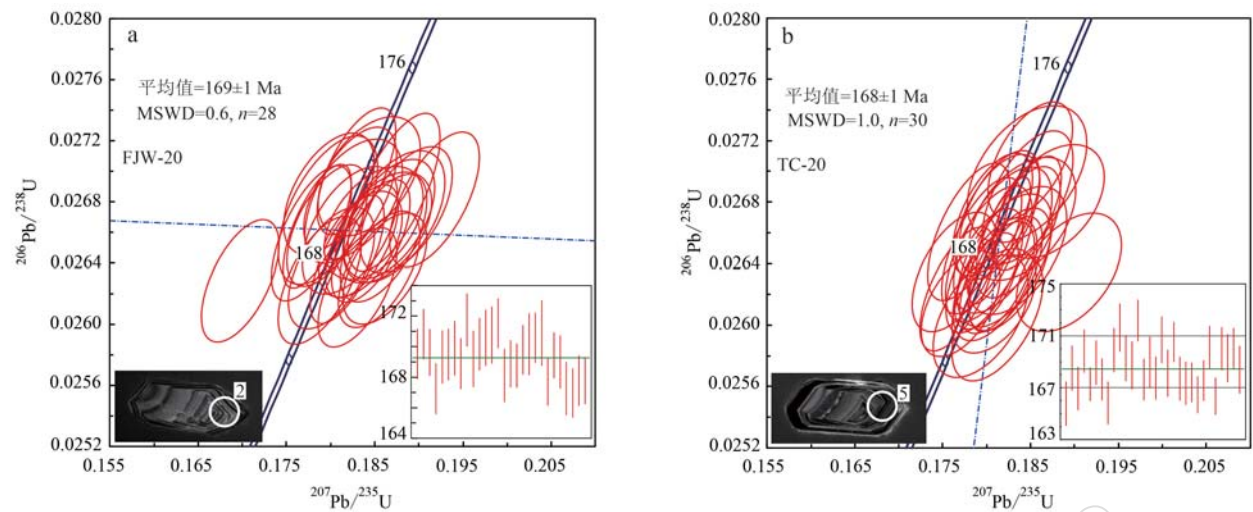


图 4 德兴石英闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of Dexing quartz diorite porphyry

表 2 德兴石英闪长玢岩锆石微量元素组成

$w_B/10^{-6}$

Table 2 Trace element data of zircon from Dexing quartz diorite porphyry

分析点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ti	Hf
铜厂																
TC-20-1	0.01	16.2	0.04	0.63	1.19	1.00	8.86	3.40	40.5	16.8	82.6	20.2	221	50.2	4.13	10 082
TC-20-3	0.07	27.2	0.04	0.78	1.66	0.95	9.27	3.77	53.9	22.8	120	29.9	320	74.0	6.34	9 966
TC-20-4	0.07	27.0	0.06	0.36	1.09	0.64	7.59	2.53	31.6	12.7	63.8	15.7	168	38.4	2.58	9 826
TC-20-5	0.01	50.5	0.07	1.30	2.31	1.53	16.3	5.20	67.9	28.2	140	33.8	362	83.6	4.14	9 527
TC-20-6	0.09	52.5	0.11	1.35	2.29	1.49	14.9	5.10	63.5	27.1	132	32.3	340	78.3	3.22	9 352
TC-20-7	0.03	40.6	0.12	2.54	3.90	1.64	17.1	6.24	79.8	29.9	143	34.7	352	77.1	6.82	9 828
TC-20-8	0.04	22.1	0.03	1.18	1.90	0.98	9.29	3.26	41.6	17.8	93.0	24.0	248	59.3	3.25	9 613
TC-20-9	0.09	38.2	0.13	1.47	3.29	1.29	13.3	4.62	58.4	23.6	118	29.1	307	72.8	1.48	9 535
TC-20-10	0.01	19.2	0.08	0.93	1.56	0.91	8.92	3.09	36.2	14.9	78.4	19.3	214	50.5	1.47	9 477
TC-20-11	0.00	36.4	0.07	1.55	2.99	1.39	14.7	4.85	60.3	26.2	128	30.8	319	74.9	6.50	9 521
TC-20-12	0.01	34.8	0.06	1.10	1.79	0.87	9.09	3.24	40.7	16.4	86.6	21.5	228	53.9	3.21	9 621
TC-20-13	0.01	31.5	0.09	1.06	2.20	1.02	10.5	3.80	49.1	20.7	100	25.0	261	61.6	4.13	9 447
TC-20-14	0.02	25.5	0.05	0.98	2.50	1.13	11.2	3.56	45.6	19.2	92.8	22.7	245	56.4	1.76	9 676
TC-20-15	0.01	30.7	0.04	1.07	1.92	1.08	10.7	3.66	47.2	19.7	100	24.2	259	61.3	1.98	9 499
TC-20-16	0.01	35.4	0.07	0.88	1.88	0.95	9.49	3.31	44.8	19.3	99.6	25.1	264	62.0	2.34	9 510
TC-20-17	0.01	37.6	0.08	1.16	2.03	1.06	12.1	5.05	68.4	29.9	162	41.4	461	106	2.07	10 311
TC-20-18	0.00	23.1	0.02	0.71	1.51	0.79	6.87	2.82	33.0	15.5	75.8	20.3	218	51.1	2.11	9 753
TC-20-19	0.03	16.9	0.02	0.48	1.07	0.67	7.60	2.96	36.8	15.3	85.9	21.5	242	57.1	2.70	9 887
TC-20-20	0.00	21.8	0.01	0.81	1.40	0.72	7.71	2.46	35.5	15.3	79.7	19.7	214	50.4	1.56	9 870
TC-20-21	0.01	37.1	0.03	0.85	1.46	0.84	9.47	3.83	49.5	21.3	117	28.5	317	75.6	4.51	9 569
TC-20-22	0.00	31.3	0.02	0.62	1.66	0.87	9.21	3.47	46.3	19.5	100	25.4	285	67.1	5.43	9 482
TC-20-24	0.01	35.1	0.04	0.85	1.76	0.94	8.41	3.66	46.2	20.6	107	26.9	294	68.0	3.30	9 754
TC-20-25	0.37	63.4	0.46	4.43	5.70	2.99	29.9	8.86	109	40.6	189	43.3	428	94.7	4.80	9 597
TC-20-27	0.09	32.8	0.15	2.53	2.72	1.75	15.3	5.18	62.7	24.6	127	30.7	329	74.9	1.79	9 665
TC-20-28	0.00	30.6	0.04	1.01	1.44	0.81	9.03	3.04	36.3	14.9	75.8	18.1	190	43.5	1.52	10 170
TC-20-29	0.00	31.0	0.14	0.96	2.31	1.48	14.9	4.63	61.7	25.7	127	31.8	342	78.4	2.71	9 566
TC-20-30	0.00	27.9	0.02	0.92	1.65	0.99	10.6	3.52	46.8	19.7	101	25.0	265	59.4	3.35	9 493
TC-20-31	0.01	30.7	0.07	0.81	2.00	1.27	12.3	4.73	60.9	25.9	133	31.8	357	80.4	2.11	9 967
TC-20-32	0.02	35.1	0.04	0.82	1.64	0.92	11.1	4.13	53.8	23.9	123	29.5	328	72.9	4.36	10 083

续表 2

Continued Table 2

分析点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ti	Hf
富家坞																
FJW20-1	0.05	27.9	0.07	0.89	1.62	1.06	10.9	4.06	57.0	24.8	129	32.3	346	79.5	4.46	9 927
FJW20-2	0.00	22.5	0.05	0.82	1.51	0.80	8.62	3.15	46.0	19.3	104	26.3	293	68.9	5.10	9 943
FJW20-3	0.13	36.7	0.15	1.59	2.86	1.76	17.7	5.84	77.0	31.4	160	38.1	408	93.8	8.52	9 666
FJW20-4	0.01	15.3	0.03	0.26	1.31	0.67	6.36	2.24	32.6	14.8	74.5	19.0	220	52.1	1.12	9 911
FJW20-5	0.01	22.0	0.05	0.52	1.14	0.89	9.39	3.36	46.6	20.1	107	26.6	290	68.8	2.82	10 044
FJW20-6	0.00	18.8	0.05	0.93	1.49	1.08	11.1	3.77	47.3	19.3	96.3	23.3	255	56.9	0.85	10 136
FJW20-7	0.00	35.3	0.06	1.17	1.86	1.16	13.2	4.60	53.5	21.4	106	25.4	271	60.2	2.54	10 062
FJW20-8	0.00	15.5	0.03	0.44	1.24	0.79	7.53	2.92	37.5	15.1	73.9	19.1	208	50.3	2.32	9 865
FJW20-10	0.01	23.3	0.04	0.97	1.47	0.77	9.12	3.35	47.8	20.3	104	27.3	291	68.9	4.32	10 109
FJW20-11	0.00	22.6	0.05	0.39	1.49	0.94	8.89	3.41	48.4	20.3	106	26.6	299	69.2	3.06	9 933
FJW20-12	0.04	25.1	0.05	1.28	2.18	1.39	12.9	4.06	56.8	21.5	109	26.9	278	63.1	2.82	9 789
FJW20-13	0.06	17.8	0.07	0.62	1.83	0.80	8.39	2.84	40.7	16.0	81.9	21.0	226	53.1	2.29	9 926
FJW20-14	0.01	27.5	0.03	0.88	2.17	0.92	10.6	3.87	53.2	23.0	118	29.1	311	71.0	1.10	9 856
FJW20-15	0.00	22.4	0.02	0.40	1.50	0.71	8.98	3.00	39.3	17.1	90.6	23.0	250	58.3	3.22	9 949
FJW20-16	0.01	30.2	0.05	0.57	1.94	1.16	13.4	5.59	78.1	33.6	169	41.3	434	98.2	3.47	10 440
FJW20-17	0.01	24.9	0.02	0.53	1.69	0.75	8.73	3.09	38.3	15.6	79.0	18.7	196	43.8	1.13	10 161
FJW20-18	0.02	32.3	0.11	1.82	3.21	1.52	18.9	6.14	71.9	30.6	146	34.6	356	80.7	6.74	10 018
FJW20-20	0.31	23.4	0.08	0.98	1.60	0.90	9.37	3.36	47.0	20.4	103	25.4	280	66.5	3.14	9 690
FJW20-21	0.01	25.7	0.03	0.84	1.53	0.93	10.2	3.87	51.3	23.3	119	30.4	337	78.1	3.52	9 743
FJW20-22	0.04	29.8	0.04	0.89	1.58	1.00	11.6	4.38	58.4	24.5	118	29.4	311	69.6	6.49	9 662
FJW20-23	0.00	33.9	0.03	0.58	2.31	1.12	13.0	4.53	63.1	26.8	132	31.3	330	80.4	1.11	9 719
FJW20-24	0.01	27.2	0.02	0.93	1.50	1.03	7.85	2.88	37.1	14.8	70.9	18.2	186	43.2	1.43	9 965
FJW20-25	0.00	20.6	0.03	0.44	1.53	0.80	8.23	2.90	41.6	18.5	94.4	25.1	268	63.4	4.40	9 789
FJW20-28	0.01	26.5	0.03	0.76	1.63	0.96	10.2	3.98	53.0	22.6	119	31.0	331	78.1	2.94	9 783
FJW20-29	0.01	19.4	0.03	0.59	1.17	0.80	7.63	3.21	37.6	17.3	88.7	22.5	244	57.4	2.96	10 033
FJW20-30	0.01	21.1	0.05	0.54	1.27	0.69	7.97	3.41	42.9	18.9	99.9	25.6	277	65.8	1.50	9 874

晶作用。微量元素蛛网图显示样品富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,具有明显的 Nb、Ta、Ti 的负异常(图 7b),指示其具有弧岩浆亲合性(Richards, 2011)(图 6d)。值得注意的是,石英闪长玢岩具有明显的 Ba 和 Sr 的正异常,与受交代岩石圈地幔来源的中性岩浆岩特征一致(Wang *et al.*, 2018),这一富集特征是由早期俯冲事件释放流体携带大量 Ba、Sr 进入岩石圈地幔引起的(Richards, 2011)。

德兴成矿花岗闪长斑岩中的暗色微粒包体 SiO₂ 含量介于 57.50%~60.44%之间,样品 K₂O 含量为 0.98%~3.67%,稀土元素球粒陨石标准化图呈现明显的右倾轻稀土元素富集的配分模式,具有 Eu 的负异常(图 7a),微量元素蛛网图显示样品富集大离子亲石元素、亏损高场强元素的特征(图 7b)(Hou *et al.*, 2013)。主、微量元素图解显示,德兴石英闪长玢岩与暗色包体具有非常相似的地球化学组成(图 6、图 7)。

3.4 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素结果见表 5。测试点的¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 值为 0.022 775~0.054 964,¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值为 0.000 637~0.001 502,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282 734~0.282 896。利用相应锆石 U-Pb 年龄计算得到 $\varepsilon\text{Hf}(t) = 2.20 \sim 7.93$,两阶段模式年龄为 1 075 ~ 709 Ma。

4 讨论

4.1 岩浆源区

德兴石英闪长玢岩具有高的 MgO 含量(3.71%~4.87%)和 Mg[#]值(50.3~56.8),明显高于下地壳变玄武岩脱水熔融形成的熔体(Mg[#]<44)(Altherr *et al.*, 2000)。Nb/Ta 值介于 13.0~16.8 之间(平均值为 15.4),也显著高于下地壳的 8.0(Rudnick and Gao, 2003),上述证据表明其原始岩浆并非来源于下地壳变玄武岩的熔融。石英闪长玢岩 Lu/Yb 值较

表3 德兴石英闪长玢岩锆石结晶温度、 Ce^{4+}/Ce^{3+} 、 Eu/Eu^* 、 $(Ce/Ce^*)_D$ 及氧逸度计算结果

Table 3 Ti-in-zircon temperatures, Ce^{4+}/Ce^{3+} , Eu/Eu^* and $(Ce/Ce^*)_D$ ratios, $lg f_{O_2}$ values of zircons from the Dexing quartz diorite porphyry

测试点	t/°C	Ce^{4+}/Ce^{3+}	Eu/Eu^*	$(Ce/Ce^*)_D$	$lg f_{O_2}$
铜厂					
TC-20-1	698	210	1.27	211	-10.5
TC-20-3	736	322	1.00	322	-6.87
TC-20-4	660	507	0.92	507	-9.39
TC-20-5	699	303	1.03	303	-9.10
TC-20-6	678	303	1.06	303	-10.3
TC-20-7	743	103	0.83	104	-10.8
TC-20-8	679	153	0.96	154	-12.8
TC-20-9	618	169	0.80	169	-16.1
TC-20-10	618	161	1.00	162	-16.3
TC-20-11	739	161	0.86	162	-9.34
TC-20-12	678	248	0.89	249	-11.0
TC-20-13	698	216	0.88	216	-10.4
TC-20-14	631	163	0.88	164	-15.4
TC-20-15	639	222	0.98	223	-13.7
TC-20-16	652	321	0.93	322	-11.6
TC-20-17	643	339	0.89	339	-12.0
TC-20-18	644	268	1.01	268	-12.7
TC-20-19	664	328	0.97	328	-10.8
TC-20-20	622	232	0.90	233	-14.7
TC-20-21	706	434	0.94	434	-7.35
TC-20-22	722	413	0.92	413	-6.66
TC-20-24	680	366	1.01	366	-9.45
TC-20-25	712	81.3	0.95	82.2	-13.3
TC-20-27	632	102	1.12	103	-17.1
TC-20-28	620	230	0.92	231	-14.9
TC-20-29	664	235	1.04	236	-12.1
TC-20-30	681	247	0.97	248	-10.9
TC-20-31	644	304	1.06	305	-12.3
TC-20-32	703	377	0.88	377	-8.03
富家坞					
FJW20-1	705	300	1.04	301	-8.78
FJW20-2	717	264	0.91	265	-8.63
FJW20-3	765	177	1.02	177	-7.71
FJW20-4	598	437	0.96	438	-13.9
FJW20-5	667	410	1.12	411	-9.77
FJW20-6	580	163	1.10	164	-18.9
FJW20-7	659	223	0.97	224	-12.5
FJW20-8	652	267	1.07	268	-12.3
FJW20-9	718	76.1	1.01	76.9	-13.2
FJW20-10	702	238	0.86	238	-9.80
FJW20-11	674	467	1.07	467	-8.89
FJW20-12	667	144	1.08	144	-13.7
FJW20-13	651	202	0.84	202	-13.4
FJW20-14	597	244	0.79	245	-16.2
FJW20-15	678	413	0.80	413	-9.12
FJW20-16	684	439	0.94	439	-8.50
FJW20-17	599	291	0.80	292	-15.4
FJW20-18	742	117	0.81	118	-10.4
FJW20-20	675	219	0.96	220	-11.6
FJW20-21	685	301	0.97	301	-9.89
FJW20-22	739	288	0.96	289	-7.17
FJW20-23	598	395	0.84	396	-14.3
FJW20-24	616	221	1.24	222	-15.3
FJW20-25	704	376	0.93	377	-8.00
FJW20-28	670	321	0.97	321	-10.5
FJW20-29	671	306	1.10	307	-10.6
FJW20-30	619	365	0.90	366	-13.2

表4 德兴石英闪长玢岩主量元素($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)测试结果

Table 4 Major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) data of the Dexing quartz diorite porphyry

样品	FJW-20	TC-20	TC-20-2	TC-9	TC-9-2	TC-9-3
SiO ₂	57.11	59.24	55.15	57.74	59.54	55.52
TiO ₂	0.59	0.56	0.67	0.62	0.55	0.65
Al ₂ O ₃	15.19	15.40	15.37	15.24	14.75	15.19
TFe ₂ O ₃	5.74	6.95	7.32	7.41	6.86	8.12
FeO	3.34	3.48	3.80	3.46	3.54	3.48
MnO	0.17	0.03	0.04	0.06	0.04	0.06
MgO	3.80	4.06	4.49	4.43	3.50	4.63
CaO	5.24	4.13	5.29	5.09	3.65	5.19
Na ₂ O	3.18	3.57	3.14	3.83	3.53	3.60
K ₂ O	2.77	2.58	2.48	1.64	1.58	1.71
P ₂ O ₅	0.25	0.28	0.36	0.36	0.32	0.38
LOI	5.36	2.73	4.94	2.99	3.98	4.22
SUM	99.41	99.53	99.26	99.42	98.30	99.29
Mg [#]	56.8	53.7	54.9	54.2	50.3	53.1
Li	48.1	18.8	32.6	21.6	52.2	26.7
Be	1.36	1.53	1.51	1.39	1.20	1.55
Sc	17.0	15.0	17.2	15.4	14.4	17.1
V	146	132	146	129	130	140
Cr	96.4	133	107	161	140	178
Co	17.2	13.8	15.6	14.5	13.6	15.2
Ni	34.7	39.9	44.1	53.5	44.3	54.6
Cu	8.75	7.72	14.7	38.7	141	227
Zn	121	39.9	43.2	60.0	62.8	61.1
Ga	18.1	19.6	19.9	18.8	19.8	19.0
Rb	76.9	113	108	62.3	64.4	66.2
Sr	819	707	1 649	2 626	1 542	2 098
Y	14.3	14.3	21.9	17.9	15.0	20.2
Zr	107	121	135	107	102	114
Nb	8.89	10.3	12.8	8.81	9.01	9.32
Sn	0.76	1.19	1.18	0.98	1.07	1.03
Cs	11.8	9.23	19.9	15.2	23.9	20.8
Ba	3 040	511	1 120	549	6 036	1 618
La	35.6	22.6	33.4	26.9	24.9	27.4
Ce	59.1	43.5	66.8	54.9	48.0	56.3
Pr	6.24	5.04	7.95	6.55	5.78	6.91
Nd	23.1	20.4	31.7	26.5	23.0	28.2
Sm	3.90	3.69	6.02	4.91	4.23	5.37
Eu	1.31	0.83	1.09	0.96	1.09	0.95
Gd	3.19	3.20	5.00	4.19	3.42	4.57
Tb	0.48	0.43	0.70	0.58	0.50	0.65
Dy	2.66	2.64	4.00	3.07	2.81	3.58
Ho	0.50	0.49	0.81	0.64	0.53	0.70
Er	1.48	1.34	2.16	1.63	1.38	1.88
Tm	0.21	0.20	0.31	0.23	0.21	0.27
Yb	1.40	1.36	2.08	1.54	1.35	1.72
Lu	0.21	0.21	0.32	0.24	0.20	0.26
Hf	2.89	3.04	3.33	2.80	2.71	2.85
Ta	0.68	0.63	0.77	0.58	0.61	0.57
Tl	0.55	0.72	0.74	0.38	0.41	0.42
Pb	35.7	4.39	5.48	7.32	8.60	8.50
Th	14.9	14.8	13.2	13.6	12.0	12.6
U	3.81	3.31	3.29	2.10	1.57	2.02
ΣREE	139	106	162	133	117	139
LREE	129	96	147	121	107	125
HREE	10.1	9.9	15.4	12.1	10.4	13.6
L/H	12.80	9.71	9.56	9.98	10.30	9.17
(La/Yb) _N	18.3	11.9	11.5	12.6	13.2	11.4
Yb _N	8.23	8.00	12.20	9.05	7.93	10.10
Eu/Eu [*]	1.10	0.72	0.59	0.63	0.85	0.57

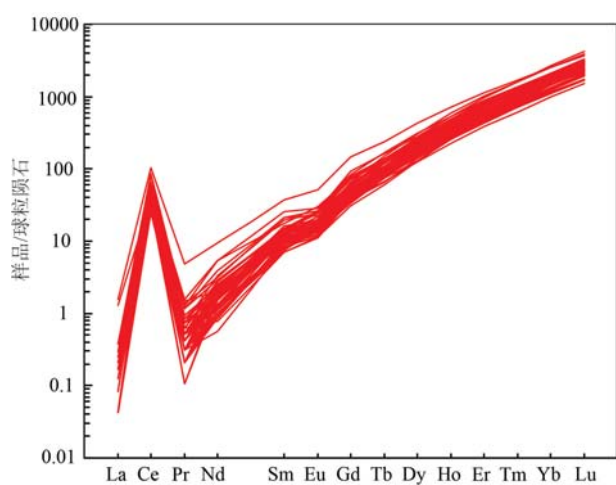


图5 德兴石英闪长玢岩锆石稀土元素球粒陨石标准化图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE diagram for zircons from the Dexing quartz diorite porphyry

低且集中分布于0.15~0.16之间,与德兴暗色包体(0.14~0.16)以及幔源岩浆(0.14~0.16)的变化范围一致(Sun and McDonough, 1989)。Zr/Hf值介于37.1~40.6之间(平均值为38.9),与暗色包体平均值31.0和原始地幔平均值36.3较为接近,显著高于壳源岩浆相应比值(11.0)(孙志远等, 2018)。

石英闪长玢岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为2.2~7.9(图8),与华南辉长岩(3.4~6.4; Yang *et al.*, 2021)、桃园辉长岩体(3.2~6.5; Zhong *et al.*, 2013)和思泰辉长岩体(0.39~5.84; 农军年等, 2017)较为相似。此外,研究发现华南晚侏罗世里松花岗岩暗色包体锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于-2.9~8.0之间,并且暗色包体Hf-O同位素组成具有明显的双峰式分布,其中一组锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为3.1~8.0(Li *et al.*, 2009),与本次研究的石英闪长玢岩较为相似。综合以上结果,我们认为德兴石英闪长玢岩原始岩浆来自于岩石圈地幔。

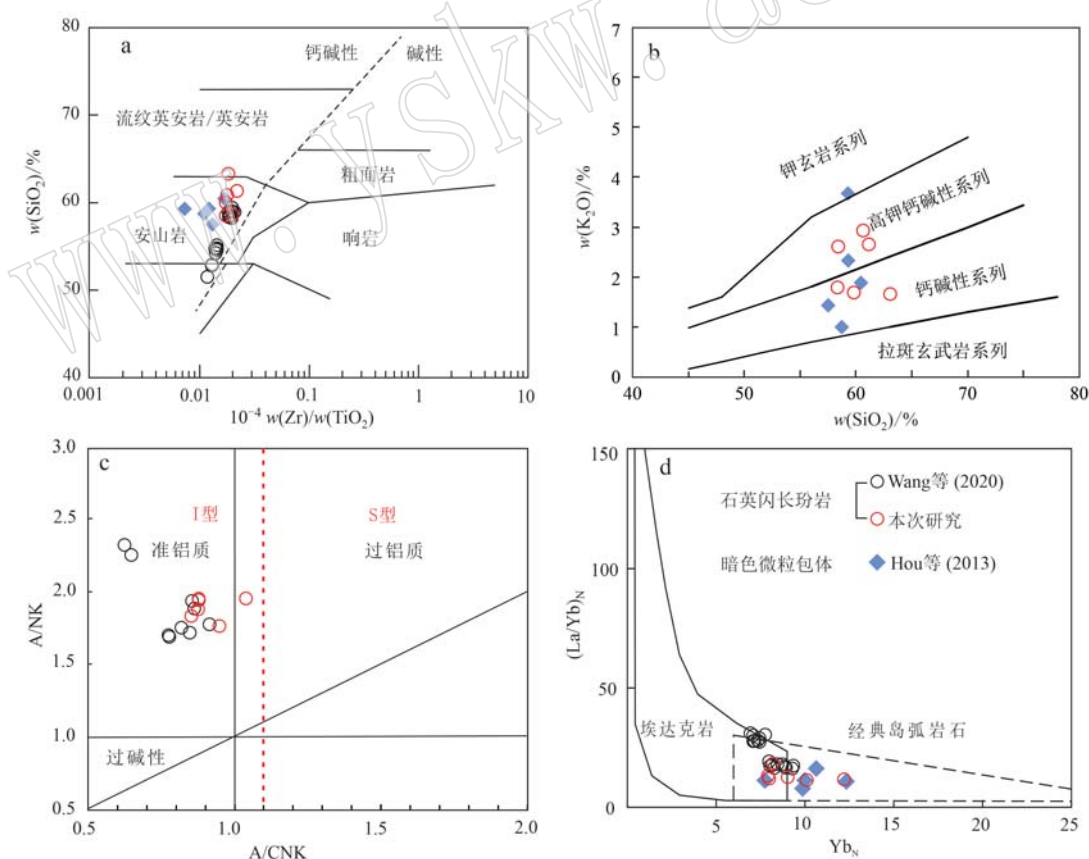


图6 SiO_2 -Zr/TiO₂图(a, 据 Winchester and Floyd, 1977)、 K_2O -SiO₂图(b)、A/NK-A/CNK图(c, 据 Maniar and Piccoli, 1989)和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ -Yb_N图(d, 据 Drummond and Defant, 1990)

Fig. 6 SiO_2 -Zr/TiO₂(a, after Winchester and Floyd, 1977), K_2O -SiO₂(b), A/NK-A/CNK (c, after Maniar and Piccoli, 1989) and $(\text{La}/\text{Yb})_N$ -Yb_N(d, after Drummond and Defant, 1990) diagrams

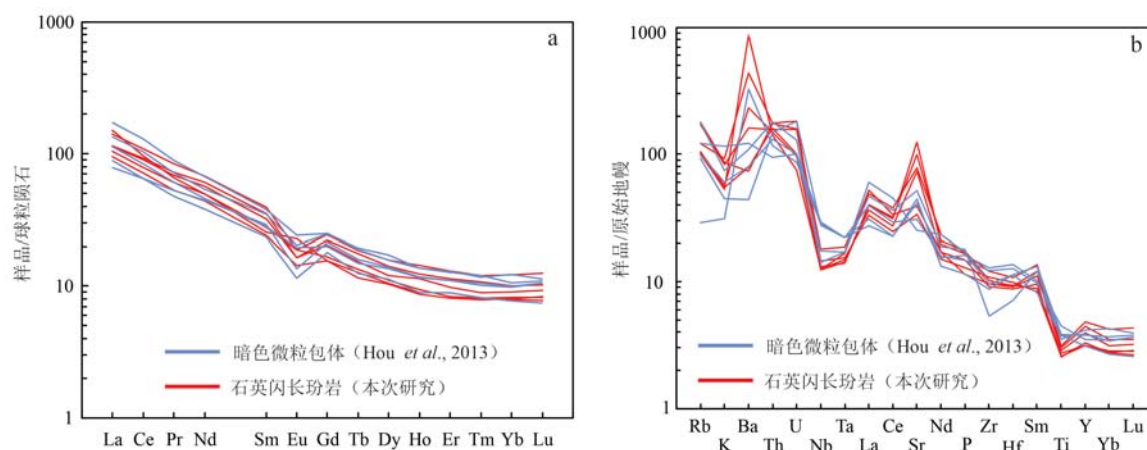


图7 德兴石英闪长玢岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)
(球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (b) for Dexing quartz diorite porphyry (chondrite, primitive mantle normalized data after Sun and McDonough, 1989)

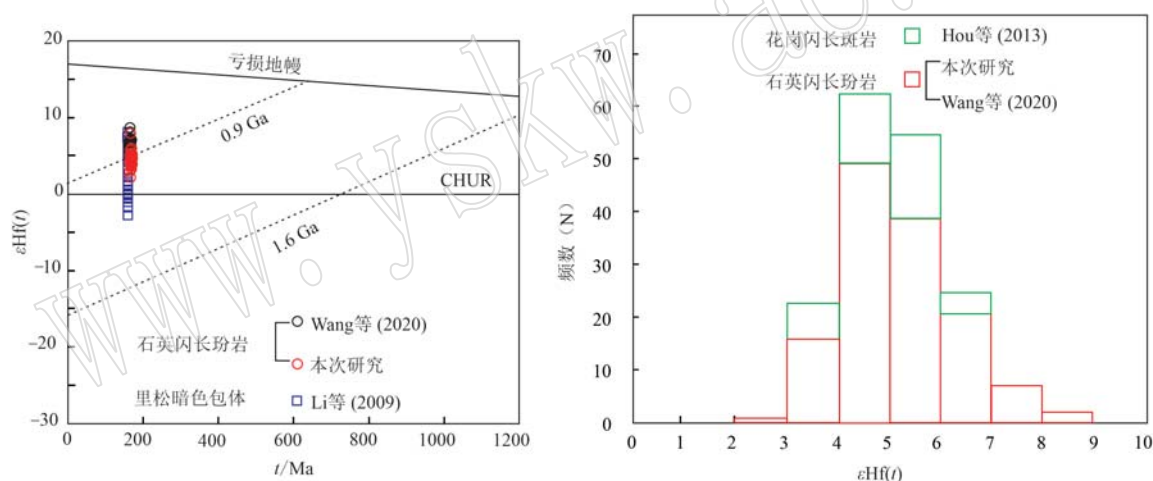


图8 德兴石英闪长玢岩锆石 Hf 同位素图解(a)和 Hf 同位素直方图(b)

Fig. 8 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ - t diagram (a) and histogram of $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values (b) of zircons from the Dexing quartz diorite porphyry

德兴石英闪长玢岩具有高的 Th/Yb 值(6.37~10.9),明显高于 MORB 和 OIB 等软流圈地幔来源的岩石(图9a)(Pearce, 2008)。在 $\text{Th}/\text{Nb}-\text{TiO}_2/\text{Yb}$ 图解(图9b)中,石英闪长玢岩投影在俯冲改造岩石圈区域内, Th/Nb 值大于1且高于下地壳的相应比值(Wade *et al.*, 2019)。德兴暗色包体 Th/Yb 和 Th/Nb 值与石英闪长玢岩较为一致(图9)。上述结果指示石英闪长玢岩原始岩浆来源于俯冲流体改造的岩石圈地幔,这也得到岩石微量元素分析结果的证实。德兴石英闪长玢岩样品具有富集轻稀土和大离子亲石元素、亏损重稀土和高场强元素的微量元素

特征,显示俯冲带流体作用地球化学特征以及明显的弧岩浆亲合性(Richards, 2011)。

4.2 岩石成因

德兴石英闪长玢岩发育明显的矿物结构和成分的不平衡现象,比如广泛出现的浑圆状石英斑晶及其熔蚀结构(图3d),部分磷灰石单矿物阴极发光图像具有明显的核边分带结构(图3f),这些磷灰石核部和边部的 S 含量具有突变现象(未发表数据),以上证据均指示存在岩浆混合作用(Yang *et al.*, 2015)。在 $\text{TFEO}-\text{MgO}$ 图解上,石英闪长玢岩没有沿着基性岩浆分离结晶趋势线分布,而是与德兴成矿

表5 德兴石英闪长玢岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 5 Zircon Hf isotopic results of quartz diorite porphyry from Dexing porphyry deposit

分析点	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	1σ	t_{DM}/Ma	1σ	t_{DM2}/Ma	1σ
铜厂													
TC-20-1	166	0.034 092	0.000 556	0.000 949	0.000 012	0.282 758	0.000 010	3.04	0.35	700	14	1021	23
TC-20-2	169	0.040 746	0.000 723	0.001 138	0.000 022	0.282 807	0.000 009	4.81	0.31	634	12	910	20
TC-20-3	167	0.032 156	0.000 620	0.000 915	0.000 016	0.282 792	0.000 011	4.25	0.39	652	16	944	25
TC-20-4	170	0.022 775	0.000 152	0.000 637	0.000 003	0.282 789	0.000 009	4.26	0.31	651	12	946	20
TC-20-5	167	0.044 949	0.000 254	0.001 269	0.000 008	0.282 795	0.000 012	4.35	0.42	652	17	938	27
TC-20-6	169	0.028 456	0.000 494	0.000 805	0.000 013	0.282 788	0.000 010	4.20	0.34	654	14	949	22
TC-20-8	166	0.043 766	0.000 449	0.001 238	0.000 016	0.282 786	0.000 017	4.02	0.61	665	25	958	39
TC-20-9	170	0.035 503	0.000 839	0.001 020	0.000 019	0.282 803	0.000 011	4.70	0.39	638	16	918	25
TC-20-10	172	0.037 910	0.000 416	0.001 062	0.000 011	0.282 802	0.000 010	4.73	0.36	639	15	917	23
TC-20-11	169	0.054 964	0.000 640	0.001 502	0.000 018	0.282 802	0.000 013	4.61	0.45	647	19	923	29
TC-20-12	169	0.038 557	0.000 247	0.001 075	0.000 007	0.282 770	0.000 011	3.51	0.39	685	16	993	25
TC-20-13	172	0.035 496	0.000 685	0.001 003	0.000 015	0.282 798	0.000 011	4.59	0.37	644	15	926	24
TC-20-14	168	0.036 286	0.000 208	0.001 026	0.000 005	0.282 815	0.000 012	5.09	0.41	620	16	891	26
TC-20-15	169	0.040 847	0.000 377	0.001 146	0.000 009	0.282 814	0.000 011	5.06	0.38	624	15	894	25
TC-20-16	168	0.029 832	0.000 505	0.000 830	0.000 013	0.282 801	0.000 010	4.62	0.35	637	14	922	23
TC-20-18	171	0.035 662	0.000 309	0.000 992	0.000 007	0.282 804	0.000 010	4.76	0.36	636	15	915	23
TC-20-19	168	0.034 677	0.000 277	0.000 990	0.000 006	0.282 791	0.000 010	4.25	0.36	654	15	945	23
TC-20-20	171	0.028 899	0.000 385	0.000 810	0.000 009	0.282 814	0.000 010	5.16	0.35	618	14	889	22
TC-20-21	168	0.038 152	0.000 352	0.001 095	0.000 008	0.282 823	0.000 010	5.36	0.35	610	14	874	22
TC-20-22	167	0.041 830	0.000 302	0.001 223	0.000 009	0.282 734	0.000 011	2.20	0.40	738	16	1 075	26
TC-20-23	167	0.031 368	0.000 252	0.000 883	0.000 005	0.282 830	0.000 010	5.63	0.34	596	14	856	22
TC-20-24	166	0.039 352	0.000 213	0.001 130	0.000 007	0.282 809	0.000 012	4.84	0.40	630	16	906	26
TC-20-26	168	0.029 838	0.000 434	0.000 843	0.000 011	0.282 792	0.000 010	4.29	0.35	650	14	943	23
TC-20-27	170	0.041 644	0.000 645	0.001 191	0.000 017	0.282 839	0.000 009	5.98	0.32	588	13	836	20
TC-20-28	166	0.034 506	0.000 320	0.000 964	0.000 011	0.282 795	0.000 009	4.34	0.33	648	13	938	21
TC-20-29	170	0.044 194	0.000 195	0.001 261	0.000 006	0.282 809	0.000 011	4.89	0.37	633	15	906	24
TC-20-30	169	0.037 507	0.000 213	0.001 075	0.000 005	0.282 788	0.000 011	4.17	0.37	659	15	951	24
TC-20-31	170	0.037 089	0.000 557	0.001 070	0.000 013	0.282 779	0.000 009	3.87	0.33	672	13	971	21
TC-20-32	168	0.024 719	0.000 605	0.000 686	0.000 015	0.282 806	0.000 008	4.80	0.28	628	11	910	18
富家坞													
FJW-20-1	170	0.050 072	0.000 343	0.001 371	0.000 007	0.282 805	0.000 010	4.73	0.36	641	15	916	23
FJW-20-2	171	0.032 625	0.000 428	0.000 910	0.000 011	0.282 800	0.000 008	4.65	0.27	639	11	922	17
FJW-20-4	170	0.038 069	0.000 320	0.001 063	0.000 009	0.282 792	0.000 010	4.32	0.36	654	15	942	23
FJW-20-5	167	0.035 151	0.000 326	0.001 012	0.000 009	0.282 896	0.000 019	7.93	0.67	506	27	709	44
FJW-20-6	169	0.039 653	0.000 245	0.001 085	0.000 008	0.282 776	0.000 010	3.73	0.36	677	14	979	23
FJW-20-7	169	0.045 644	0.000 308	0.001 298	0.000 006	0.282 777	0.000 011	3.74	0.39	679	16	978	25
FJW-20-8	170	0.034 158	0.000 066	0.000 974	0.000 002	0.282 761	0.000 009	3.22	0.31	697	13	1 012	20
FJW-20-9	169	0.041 339	0.000 503	0.001 152	0.000 013	0.282 799	0.000 010	4.53	0.35	646	14	928	23
FJW-20-10	172	0.043 097	0.000 643	0.001 199	0.000 016	0.282 781	0.000 009	3.96	0.33	672	13	967	21
FJW-20-11	169	0.039 914	0.000 480	0.001 106	0.000 011	0.282 775	0.000 010	3.68	0.35	679	14	982	22
FJW-20-12	170	0.033 438	0.000 186	0.000 939	0.000 003	0.282 789	0.000 010	4.22	0.35	656	14	949	23
FJW-20-13	171	0.031 674	0.000 214	0.000 892	0.000 004	0.282 777	0.000 011	3.84	0.39	671	16	974	25
FJW-20-14	171	0.038 876	0.000 304	0.001 077	0.000 008	0.282 779	0.000 010	3.86	0.35	673	14	972	22
FJW-20-15	172	0.031 696	0.000 321	0.000 886	0.000 008	0.282 814	0.000 011	5.16	0.37	619	15	890	24
FJW-20-16	168	0.044 878	0.000 452	0.001 229	0.000 010	0.282 795	0.000 011	4.38	0.38	652	16	937	25
FJW-20-17	169	0.039 023	0.000 789	0.001 095	0.000 025	0.282 811	0.000 011	4.97	0.39	627	16	900	25
FJW-20-18	169	0.041 069	0.000 538	0.001 132	0.000 010	0.282 803	0.000 011	4.69	0.37	639	15	917	24
FJW-20-19	170	0.042 112	0.000 529	0.001 186	0.000 017	0.282 801	0.000 011	4.63	0.38	643	15	922	24
FJW-20-20	170	0.040 131	0.000 343	0.001 121	0.000 008	0.282 783	0.000 011	3.99	0.40	668	16	963	26
FJW-20-21	171	0.039 575	0.000 341	0.001 106	0.000 008	0.282 781	0.000 011	3.94	0.39	670	16	967	25
FJW-20-22	171	0.037 307	0.000 576	0.001 027	0.000 014	0.282 781	0.000 010	3.95	0.36	669	15	967	23
FJW-20-24	168	0.029 403	0.000 373	0.000 814	0.000 012	0.282 807	0.000 010	4.85	0.36	628	15	907	24
FJW-20-25	169	0.032 763	0.000 381	0.000 910	0.000 009	0.282 787	0.000 009	4.13	0.31	658	13	953	20
FJW-20-26	169	0.034 205	0.000 286	0.000 974	0.000 009	0.282 792	0.000 010	4.31	0.36	652	15	942	23
FJW-20-27	167	0.036 375	0.000 469	0.001 018	0.000 012	0.282 778	0.000 010	3.77	0.36	673	15	975	23
FJW-20-28	167	0.035 313	0.000 819	0.000 994	0.000 022	0.282 795	0.000 010	4.36	0.35	649	14	937	23
FJW-20-29	168	0.038 610	0.000 411	0.001 114	0.000 013	0.282 775	0.000 011	3.66	0.38	679	16	982	25
FJW-20-30	168	0.041 767	0.000 313	0.001 203	0.000 007	0.282 815	0.000 012	5.08	0.42	623	17	892	27

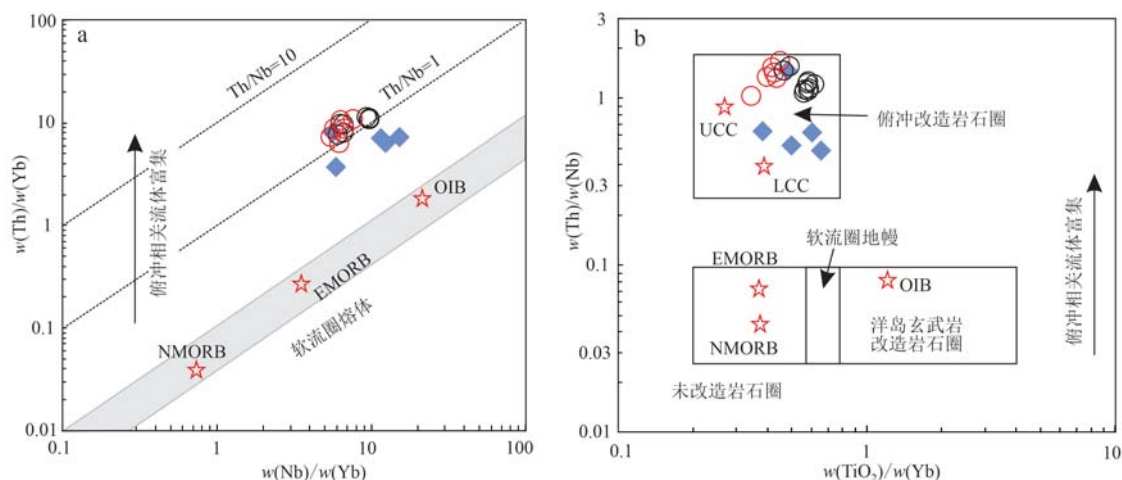


图9 Th/Yb-Nb/Yb 图解(a, 据 Pearce, 2008)和 Th/Nb-TiO₂/Yb 图解(b, 据 Wade *et al.*, 2019)

Fig. 9 Th/Yb-Nb/Yb (a, after Pearce, 2008) and Th/Nb-TiO₂/Yb (b, after Wade *et al.*, 2019) diagrams
OIB, EMORB 和 NMORB 分别代表洋岛玄武岩、富集和正常洋中脊玄武岩, UCC 和 LCC 分别代表大陆上、下地壳; 数据来源同图 6
OIB, EMORB and NMORB denote oceanic island basalt, enriched mid-ocean ridge basalt and normal mid-ocean ridge basalt, respectively; UCC and LCC represent upper and lower continental crust, respectively; data sources are as same as those in Fig. 6

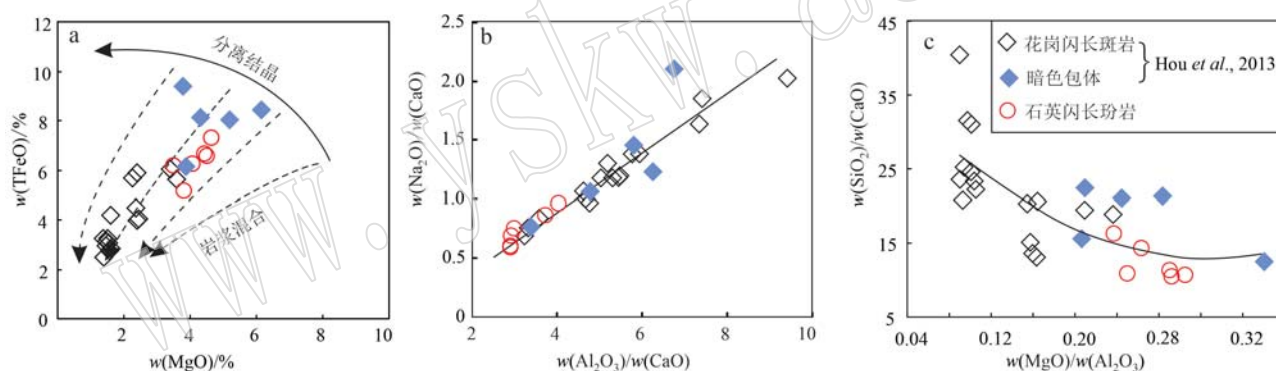


图10 德兴岩体主量元素比值协变关系图(a 据 Zorpi *et al.*, 1989)

Fig. 10 Binary diagrams of major elements for the Dexing pluton (a after Zorpi *et al.*, 1989)

花岗闪长斑岩及其暗色包体一道沿着岩浆混合趋势线排列, 显示出岩浆混合变化趋势(图 10a)(王盟等, 2019; 牛漫兰等, 2021)。在共分母协变图解(图 10b)和不共分母协变图解中(图 10c), 石英闪长玢岩与成矿花岗闪长斑岩及其闪长质暗色包体分别呈现出明显的线性相关性和曲线形态, 说明石英闪长玢岩与花岗闪长斑岩成分变化与岩浆混合关系密切(王盟等, 2019), 指示成矿花岗闪长斑岩是中侏罗世幔源基性岩浆和地壳酸性岩浆大规模混合作用的产物, 并且石英闪长玢岩代表了岩浆混合过程中的幔源基性端员。

德兴石英闪长玢岩具有轻稀土元素和大离子亲石元素富集、重稀土元素和高场强元素亏损的特征, 显示出较为明显的弧岩浆亲合性(Richards, 2011)。

前人研究认为, 江南造山带经历了早期的洋-洋俯冲(970~880 Ma)、弧-陆碰撞(880~860 Ma)、洋-陆俯冲(860~825 Ma)、碰撞后伸展(825~810 Ma)和造山后伸展(810~760 Ma) 5 个阶段(王孝磊等, 2017)。德兴石英闪长玢岩 Hf 两阶段模式年龄为 1 075~709 Ma, 集中分布于 900 Ma 左右(图 8), 与华夏地块和扬子地块碰撞之前的俯冲事件年龄(970~880 Ma)(王孝磊等, 2017)高度吻合。因此, 德兴石英闪长玢岩的弧岩浆亲合性很可能继承自华南地区早期的俯冲流体改造事件(Liu *et al.*, 2012; Hou *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015)。新元古代俯冲事件造成岩石圈地幔的改造, 使其富集易于迁移的大离子亲石元素和轻稀土元素(Sun *et al.*, 2017)。基性岩浆年代学统计结果显示, 华南在早中侏罗世

(180~170 Ma)存在一期重要的伸展拉张构造事件(姜峰等, 2020)。基于此,我们认为在中侏罗世伸展构造背景下,软流圈物质上涌导致俯冲改造的岩石圈地幔部分熔融形成幔源基性岩浆,幔源基性岩浆的底侵作用诱发下地壳物质熔融并与之发生一定程度的岩浆混合作用,形成德兴成矿花岗闪长斑岩的母岩浆,幔源岩浆为德兴矿床注入了成矿所需的部分挥发分和成矿金属。

4.3 成岩时代和岩浆氧逸度

两件德兴石英闪长玢岩样品锆石 U-Pb 年龄分别为 169 ± 1 Ma 和 168 ± 1 Ma,与德兴成矿花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄 $173 \pm 1 \sim 169 \pm 2$ Ma 基本一致(Wang *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015),也与德兴矿床富家坞矿山辉钼矿 Re-Os 等时线年龄 171 ± 1 Ma (Zhou *et al.*, 2012) 在误差范围内基本一致。上述结果表明,德兴斑岩铜矿岩浆活动和成矿事件均发生于中侏罗世。

因为变价元素 Ce 和 Eu 的存在使得锆石成为计算共存岩浆氧逸度的理想对象 (Ballard *et al.*, 2002)。不同于大部分稀土元素主要以 +3 价形式存在, Ce 在岩浆中可以 Ce^{4+} 形式存在,高氧逸度条件下由于 Ce^{4+} 与 Zr^{4+} 半径接近, Ce^{4+} 比 Ce^{3+} 更容易以类质同象形式进入锆石晶格中。Ballard 等 (2002) 提

出锆石正 Ce 异常大小可以反映岩浆氧化状态。由图 5 可见,德兴石英闪长玢岩锆石稀土元素配分图显示非常明显的正 Ce 异常,表明其岩浆体系可能具有高氧逸度的特征 (Ballard *et al.*, 2002; Loader *et al.*, 2022)。在 $\lg(Fe_2O_3/FeO)$ -TFeO 图解上,德兴石英闪长玢岩投影在中等氧化到强氧化区域(图 11)。Blevin (2004) 认为中等氧化与强氧化界线近似于 FMQ 氧逸度等级,表明石英闪长玢岩岩浆体系具有高氧逸度的特征 (Blevin, 2004)。

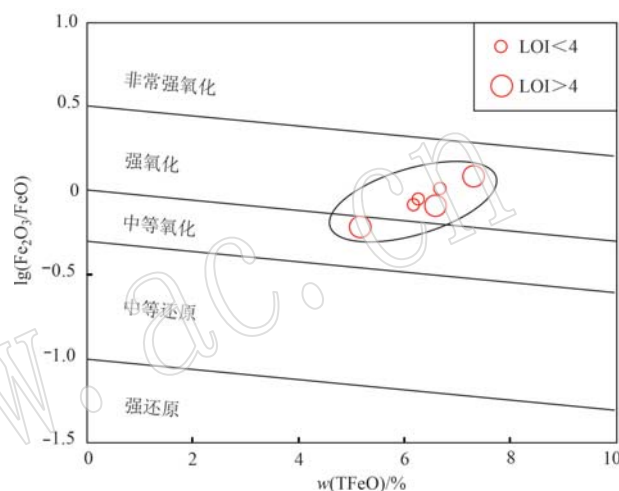


图 11 德兴石英闪长玢岩 $\lg(Fe_2O_3/FeO)$ -TFeO 图(据 Blevin, 2004)

Fig. 11 $\lg(Fe_2O_3/FeO)$ -TFeO diagram for Dexing quartz diorite porphyry (after Blevin, 2004)

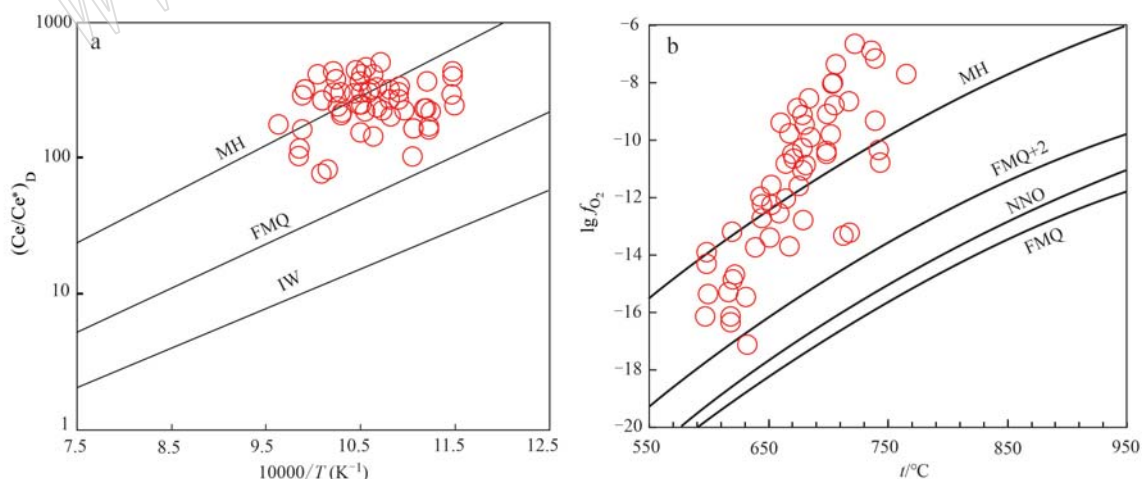


图 12 德兴石英闪长玢岩锆石 $(Ce/Ce^*)_D$ - $10\,000/T$ (a, 据 Jiang *et al.*, 2018)和 $\lg f_{O_2}$ - t (b, 据 Loader *et al.*, 2022)图解

Fig. 12 $(Ce/Ce^*)_D$ - $10\,000/T$ (a, after Jiang *et al.*, 2018) and $\lg f_{O_2}$ - t (b, after Loader *et al.*, 2022) diagrams

for the Dexing quartz diorite porphyry

磁铁矿-赤铁矿 (MH); 铁橄榄石-磁铁矿-石英 (FMQ); 镍-镍氧化物 (NNO); 铁-方铁矿 (IW)
magnetite-hematite (MH); fayalite-magnetite-quartz (FMQ); Ni-Ni oxide (NNO); Fe-wustite (IW)

由图 12a 和 12b 可见,德兴石英闪长玢岩投影在 FMQ-MH 区间,近一半锆石点计算的岩浆氧逸度达到 MH 等级,同样指示原始岩浆具有高氧逸度的特征。高氧逸度幔源岩浆的注入有利于德兴成矿岩保持高氧逸度的特征,这一现象与西藏驱龙斑岩铜矿幔源超钾质岩浆注入提高成矿岩浆氧逸度类似(李秋耘等, 2021),避免斑岩体系岩浆硫化物的早期饱和(萃取共存岩浆中的成矿金属,导致残余岩浆成矿金属含量显著下降而破坏体系的成矿能力)(Jugo, 2009; Simon and Ripley, 2011; 张铭鸿等, 2021),有利于斑岩铜矿床的形成。

5 结论

(1) 德兴石英闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 169~168 Ma,侵位于中侏罗世。

(2) 德兴石英闪长玢岩为钙碱性-高钾钙碱性系列岩石。

(3) 俯冲改造的岩石圈地幔熔融形成幔源基性岩浆,与下地壳熔融形成的岩浆发生壳幔岩浆混合作用,形成德兴成矿花岗闪长斑岩的母岩浆。

(4) 德兴石英闪长玢岩岩浆体系具有高氧逸度的特征,幔源高氧逸度岩浆的注入可有效避免斑岩体系硫化物的过早饱和而破坏成矿能力。

致谢 感谢德兴铜矿李兵、邹克和梁耀灵等 3 位专家在野外工作过程中提供的帮助和便利。感谢两位审稿专家以及终审主编提出的宝贵修改意见,对于论文质量的提升起到了重要的作用。

References

- Altherr R, Holl A, Hegner E, *et al.* 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 50 (1~3): 51~73.
- Ballard J R, Palin J M and Campbell I H. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce (IV)/Ce (III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(3): 347~364.
- Blevin P L. 2004. Redox and compositional parameters for interpreting the granitoid metallogeny of eastern Australia: Implications for gold-rich ore systems [J]. *Resource Geology*, 54(3): 241~252.
- Blichert-Toft J, Chauvel C and Albarède F. 1997. Separation of Hf and Lu for high-precision isotope analysis of rock samples by magnetic sector-multiple collector ICP-MS [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(3): 248~260.
- Cao K, Yang Z M, White N C, *et al.* 2022. Generation of the giant porphyry Cu-Au deposit by repeated recharge of mafic magmas at Pulang in Eastern Tibet [J]. *Economic Geology*, 117(1): 57~90.
- Cao K, Yang Z M, Xu J F, *et al.* 2018. Origin of dioritic magma and its contribution to porphyry Cu-Au mineralization at Pulang in the Yidun Arc, Eastern Tibet [J]. *Lithos*, 304~307: 436~449.
- Chen J F and Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeast China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. *Tectonophysics*, 284 (1~2): 101~133.
- Cheng Z G, Zhang Z C, Turesebekov A, *et al.* 2018. Petrogenesis of gabbroic intrusions in the Valerianov-Beltau-Kurama Magmatic Arc, Uzbekistan: The role of arc maturity controlling the generation of giant porphyry Cu-Au deposits [J]. *Lithos*, 320~321: 75~92.
- Cline J S and Bodnar R J. 1991. Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 96(B5): 8 113~8 126.
- Cooke D R, Hollings P and Walshe J L. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls [J]. *Economic Geology*, 100(5): 801~818.
- Drummond M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. *Journal of Geophysical Research*, 95 (B13): 21 503~21 521.
- Ferry J M and Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429~437.
- Fisher C M, Hancher J M, Samson S D, *et al.* 2011. Synthetic zircon doped with hafnium and rare earth elements: A reference material for in situ hafnium isotope analysis [J]. *Chemical Geology*, 286(1~2): 32~47.
- Gao Jun, Zhu Mingtian, Wang Xinhui, *et al.* 2019. Large-scale porphyry-type mineralization in the central Asian metallogenic domain: Tectonic background, fluid feature and metallogenic deep dynamic mechanism [J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(1): 24~71 (in Chinese with English abstract).
- Hattori K H and Keith J D. 2001. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: Evidence from Mount Pinatubo, Philippines,

- and Bingham Canyon, Utah, USA [J]. *Mineralium Deposita*, 36 (8): 799~806.
- Hou Z Q, Pan X F, Li Q Y, *et al.* 2013. The giant Dexing porphyry Cu-Mo-Au deposit in East China: Product of melting of juvenile lower crust in an intracontinental setting[J]. *Mineralium Deposita*, 48(8): 1 019~1 045.
- Hou Zengqian, Yang Zhiming, Wang Rui, *et al.* 2020. Further discussion on porphyry Cu-Mo-Au deposit formation in Chinese Mainland [J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 20~44 (in Chinese with English abstract).
- Jiang J S, Zheng Y Y, Gao S B, *et al.* 2018. The newly-discovered Late Cretaceous igneous rocks in the Nuocang District: Products of ancient crust melting triggered by Neo-Tethyan slab rollback in the Western Gangdese[J]. *Lithos*, 308~309: 294~315.
- Jugo P J. 2009. Sulfur content at sulfide saturation in oxidized magmas [J]. *Geology*, 37 (5): 415~418.
- Li W K, Cheng Y Q and Yang Z M. 2019. Geo- f_{O_2} : Integrated software for analysis of magmatic oxygen fugacity[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(5): 2 542~2 555.
- Li X H, Li W X, Wang X C, *et al.* 2009. Role of mantle-derived magma in genesis of Early Yanshanian granites in the Nanling Range, South China: In situ zircon Hf-O isotopic constraints[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(9): 1 262~1 278.
- Li X H and McCulloch M T. 1996. Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze Block: Evidence for a Proterozoic continental collision in Southeast China[J]. *Precambrian Research*, 76(1~2): 67~76.
- Li Qiuyun, Yang Zhiming, Wang Rui, *et al.* 2021. Zircon trace elemental and Hf-O isotopic compositions of the Miocene magmatic suite in the giant Qulong porphyry copper deposit, Southern Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(6): 1 023~1 048 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Fan H R, Santosh M, *et al.* 2012. Remelting of Neoproterozoic relict volcanic arcs in the Middle Jurassic: Implication for the formation of the Dexing porphyry copper deposit, Southeastern China[J]. *Lithos*, 150: 85~100.
- 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 of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Loader M A, Nathwani C L, Wilkinson J J, *et al.* 2022. Controls on the magnitude of Ce anomalies in zircon[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 328: 242~257.
- Lou Feng, Yu Yushuai, Lin Bimei, *et al.* 2020. Geochronology of mafic dikes in Heyuan fault zone, Guangdong Province and its relationship with uranium mineralization [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 36 (2): 117 ~ 128 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yuanfa and Li Wenxia. 2023. Data processing techniques for isotopic chronology and analysis of common problems[J]. *South China Geology*, 39(1): 157~171 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jianjun, Zhang Rongqing, Huang Xudong, *et al.* 2022. Metallogenic characteristics of tungsten, tin, and rare metal deposits in the Jiangnan Orogenic Belt[J]. *South China Geology*, 38(3): 359~381 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 39.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635~643.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, *et al.* 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45~55 (in Chinese with English abstract).
- Niu Manlan, Wen Fengling, Yan Zhen, *et al.* 2021. Early Paleozoic magma mixing in the Lajishan tectonic belt of South Qilian: An example from the Machang Pluton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(8): 2 364~2 384 (in Chinese with English abstract).
- Nong Junnian, Huang Xiqiang, Guo Shangyu, *et al.* 2017. Discovery of Caledonian basic rocks in Dayaoshan Region, Eastern Guangxi and its geological significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(6): 113~121 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A. 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust[J]. *Lithos*, 100(1~4): 14~48.
- Richards J P. 2011. Magmatic to hydrothermal metal fluxes in convergent and collided margins[J]. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 1~26.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. The composition of the continental crust [C]//Rudnick R L. *The Crust*. Amsterdam: Elsevier, 3: 1~64.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems [J]. *Economic Geology*, 105(1): 3~41.

- Simon A C and Ripley E M. 2011. The role of magmatic sulfur in the formation of ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 73(1): 513~578.
- Sun J J, Shu L S, Santosh M, *et al.* 2017. Neoproterozoic tectonic evolution of the Jiuling terrane in the central Jiangnan Orogenic Belt (South China): Constraints from magmatic suites [J]. *Precambrian Research*, 302: 279~297.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Geological Society Special Publications, 42: 313~345.
- Sun Zhiyuan, Long Lingli, Wang Yuwang, *et al.* 2018. SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of diorite porphyrite in Tongyuliang copper deposit, Eastern Tianshan and its geological significance[J]. *Earth Science*, 43(9): 3 001~3 017 (in Chinese with English abstract).
- Trail D, Watson E B and Tailby N D. 2012. Ce and Eu anomalies in zircon as proxies for the oxidation state of magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 97: 70~87.
- Wade C E, Payne J L, Barovich K M, *et al.* 2019. Heterogeneity of the sub-continental lithospheric mantle and 'non-juvenile' mantle additions to a proterozoic silicic large igneous province[J]. *Lithos*, 340~341: 87~107.
- Wang F Y, Liu S G, Li S G, *et al.* 2014. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and trace elements of Mesozoic high Sr/Y porphyries from Ningzhen, Eastern China: Constraints on their petrogenesis, tectonic implications and Cu mineralization[J]. *Lithos*, 200~201: 299~316.
- Wang G G, Ni P, Li L, *et al.* 2020. Petrogenesis of the middle Jurassic andesitic dikes in the giant Dexing porphyry copper ore field, South China: Implications for mineralization [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 196: 104375.
- Wang G G, Ni P, Yao J, *et al.* 2015. The link between subduction-modified lithosphere and the giant Dexing porphyry copper deposit, South China: Constraints from high-Mg adakitic rocks [J]. *Ore Geology Reviews*, 67: 109~126.
- Wang Meng, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, *et al.* 2019. Magma mixing of the Heimahe pluton in the Qinghai Nanshan tectonic zone: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology, and its tectonic implications[J]. *Earth Science*, 44(7): 2 490~2 504 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Xu J F, Jian P, *et al.* 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. *Journal of Petrology*, 47(1): 119~144.
- Wang R, Zhu D C, Wang Q, *et al.* 2020. Porphyry mineralization in the Tethyan orogen[J]. *Science China Earth Sciences*, 63(12): 2 042~2 067.
- Wang W, Zeng L S, Gao L E, *et al.* 2018. Eocene-Oligocene potassic high Ba-Sr granitoids in the Southeastern Tibet: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 322: 38~51.
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Chen Xin, *et al.* 2017. Formation and evolution of the Jiangnan Orogen[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(5): 714~735 (in Chinese with English abstract).
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325~343.
- Yang Z M, Hou Z Q, White N C, *et al.* 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet [J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1~3): 133~159.
- Yang Z M, Lu Y J, Hou Z Q, *et al.* 2015. High-Mg diorite from Qulong in Southern Tibet: Implications for the genesis of adakite-like intrusions and associated porphyry Cu deposits in collisional orogens[J]. *Journal of Petrology*, 56(2): 227~254.
- Yang J H, Zhang J H, Chen J Y, *et al.* 2021. Mesozoic continental crustal rejuvenation of South China: Insights from zircon Hf-O isotopes of Early Jurassic gabbros, syenites and A-type granites[J]. *Lithos*, 402~403: 105678.
- Zhang H, Ling M X, Liu Y L, *et al.* 2013. High oxygen fugacity and slab melting linked to Cu mineralization: Evidence from Dexing porphyry copper deposits, Southeastern China [J]. *The Journal of Geology*, 121(3): 289~305.
- Zhang Minghong, Yao Yong, Cheng Zhiguo, *et al.* 2021. Early Carboniferous quartz diorite in the Baxi copper deposit, East Junggar: Insight into potential for porphyry copper deposits[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 153~168 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Y F, Ma C Q, Zhang C, *et al.* 2013. Zircon U-Pb age, Hf isotopic compositions and geochemistry of the Silurian Fengdingshan I-type granite pluton and Taoyuan mafic-felsic complex at the Southeastern margin of the Yangtze Block[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 11~24.
- Zhou Q, Jiang Y H, Zhao P, *et al.* 2012. Origin of the Dexing Cu-bearing porphyries, SE China: Elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints[J]. *International Geology Review*, 54(5): 572~592.

Zorpi M J, Coulon C, Orsini J B, *et al.* 1989. Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons[J]. *Tectonophysics*, 157(4): 315~329.

附中文参考文献

高俊, 朱明田, 王信水, 等. 2019. 中亚成矿域斑岩大规模成矿特征——大地构造背景、流体作用与成矿深部动力学机制[J]. *地质学报*, 93(1): 24~71.

侯增谦, 杨志明, 王瑞, 等. 2020. 再论中国大陆斑岩 Cu-Mo-Au 矿床成矿作用[J]. *地学前缘*, 27(2): 20~44.

李秋耘, 杨志明, 王瑞, 等. 2021. 西藏驱龙矿区中新世侵入岩锆石微量和 Hf-O 同位素研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(6): 1 023~1 048.

娄峰, 于玉帅, 林碧美, 等. 2020. 广东河源断裂带基性岩脉时代及其与铀成矿关系[J]. *华南地质*, 36(2): 117~128.

路远发, 李文霞. 2023. 同位素年代学数据处理技术及常见问题解析[J]. *华南地质*, 39(1): 157~171.

陆建军, 章荣清, 黄旭栋, 等. 2022. 江南造山带钨锡稀有金属矿床成矿作用特征[J]. *华南地质*, 38(3): 359~381.

毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. *地学前缘*, 11(1): 45~55.

牛漫兰, 文凤玲, 闫臻, 等. 2021. 南祁连拉脊山构造带早古生代岩浆混合作用：以马场岩体为例[J]. *岩石学报*, 37(8): 2 364~2 384.

农军年, 黄锡强, 郭尚宇, 等. 2017. 桂东大瑶山地区加里东期基性岩的发现及地质意义[J]. *地质科技情报*, 36(6): 113~121.

孙志远, 龙灵利, 王玉往, 等. 2018. 东天山铜鱼梁铜矿区闪长玢岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及其地质意义[J]. *地球科学*, 43(9): 3 001~3 017.

王盟, 裴先治, 刘成军, 等. 2019. 青海南山黑马河岩体岩浆混合成因的岩石地球化学和年代学证据及其构造意义[J]. *地球科学*, 44(7): 2 490~2 504.

王瑞, 朱弟成, 王青, 等. 2020. 特提斯造山带斑岩成矿作用[J]. *中国科学：地球科学*, 50(12): 1 919~1 946.

王孝磊, 周金城, 陈昕, 等. 2017. 江南造山带的形成与演化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 36(5): 714~735.

张铭鸿, 姚勇, 程志国, 等. 2021. 新疆东准噶尔坝西早石炭世石英闪长岩及其对斑岩铜矿的指示意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(1): 153~168.