

粤东桃子窝锡矿区火山-次火山岩和花岗岩 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意义

刘 鹏^{1,2}, 程彦博^{1,3}, 王小雨¹, 张 翔^{1,2}, 高凤颖⁴, 廖正国⁴

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 武警黄金地质研究所, 河北 廊坊 065000; 3. 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点开放实验室, 北京 100037; 4. 广东省地质局第七地质大队, 广东 惠州 516300)

摘 要: 桃子窝锡矿位于莲花山断裂带西段, 是典型的火山-次火山岩型锡矿。本文以桃子窝锡矿赋矿火山-次火山岩及花岗岩为研究对象, 首次开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征研究。获得两个次火山岩样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 172.1 ± 1.1 Ma 和 171.8 ± 0.9 Ma, 一个花岗岩样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 168.9 ± 1.5 Ma, 表明桃子窝锡矿火山-侵入岩为中侏罗世同一岩浆事件不同阶段的产物。锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值大多数为负值, 只有 3 个点的值大于 0, 变化于 $-13.96 \sim 9.53$ 之间, 平均值为 -7.92 。在 $\epsilon\text{Hf}(t) - t$ 图解上, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值大多落在球粒陨石演化线之下, 有 3 个点落在球粒陨石与亏损地幔演化线之间。二阶段模式年龄除 3 个点介于 $609.6 \sim 795.5$ Ma 外, 其余点年龄为 $1450.8 \sim 2102.5$ Ma, Hf 同位素特征指示成岩物质主要来源于早中元古代古老地壳的部分熔融, 还有新元古代新生地壳物质的加入。结合区内已有的研究成果, 认为桃子窝锡矿及有关的火山-次火山岩与中生代太平洋板块向欧亚大陆俯冲有关。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 火山-次火山岩; 桃子窝锡矿; 粤东

中图分类号: P588.14; P588.12⁺1; P597 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2015)05-0620-17

Zircon U-Pb geochronology and characteristics of Hf isotope from the Taoziwo Sn deposit in eastern Guangdong Province and their significance

LIU Peng^{1,2}, CHENG Yan-bo^{1,3}, WANG Xiao-yu¹, ZHANG Xiang^{1,2}, GAO Feng-ying⁴ and LIAO Zheng-guo⁴

(1. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Gold Geological Institute of CAPF, Langfang 065000, China; 3. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. No. 7 Geological Party of Guangdong, Huizhou 516300, China)

Abstract: The Taoziwo tin deposit located in the west of Lianhuashan faulted belt is a typical volcanic-subvolcanic tin deposit. With the ore-bearing volcanic-subvolcanic rock and granite in the Taoziwo tin deposit as the study objects, the authors performed in situ zircon U-Pb dating and Hf isotopic analyses for the first time. Two samples of volcanic-subvolcanic rocks yielded weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 172.1 ± 1.1 Ma and 171.8 ± 0.9 Ma respectively. A granite sample yielded the weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 168.9 ± 1.5 Ma. These data indicate that they were formed at different stages of the same Middle-Jurassic magmatic event. Most of $\epsilon\text{Hf}(t)$ values are negative, except for three $\epsilon\text{Hf}(t)$ values which vary from -13.96 to 9.53 with the mean value

收稿日期: 2014-12-10; 修订日期: 2015-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41302055); 北京市优秀博士论文资助项目(519002650744)

作者简介: 刘 鹏(1988-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: plaoda@126.com。

Key words: zircon U-Pb dating; Hf isotopes; volcanic-subvolcanic rocks; Taoziwo tin deposit; eastern Guangdong Province

南方向的粤东地区,分布着大面积中生代火山-侵入岩,与其伴生着多个锡、铜、钨、金、银、铅、锌矿床(点),在这些矿床(点)中,尤其以锡、铜矿发育最为广泛(图1)。与南岭地区不同的是,粤东锡矿主要是与火山-次火山岩有关,且严格受火山盆地、火山机构控制。相比南岭地区的锡矿,关于此类锡矿的研究鲜有报道。

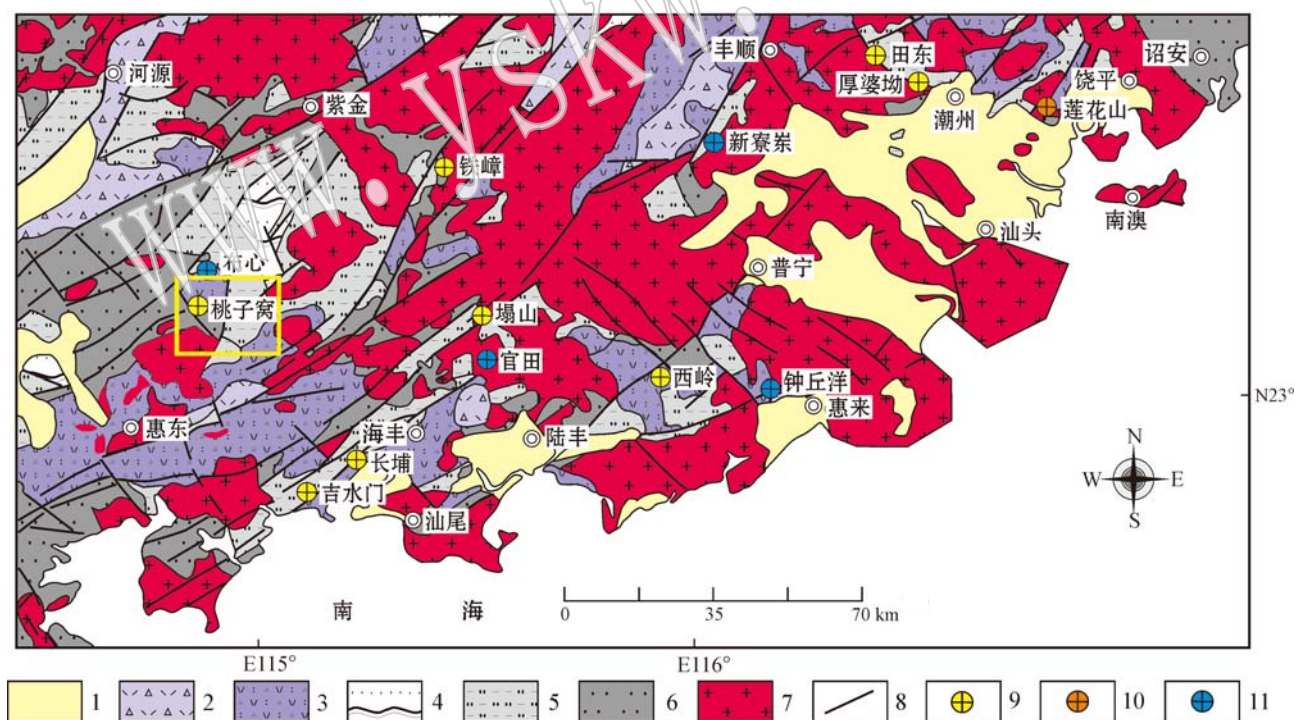


Fig. 1 Geological and mineral resources map of eastern Guangdong Province

1—Quaternary; 2—Early Cretaceous volcanic breccia; 3—Late Jurassic volcanic rocks; 4—Middle Jurassic metamorphic sandstone; 5—Early Jurassic argillaceous sandstone; 6—Early Triassic sandstone; 7—Mesozoic granite; 8—fault; 9—tin deposit; 10—tungsten deposit; 11—copper-lead-zinc polymetallic deposit

世界范围内,与火山-次火山岩有关的锡矿分布十分局限,主要分布在墨西哥马德雷地区、玻利维亚南部以及我国粤东地区。粤东发育多个与火山-次火山岩有关的锡多金属矿床(岳书仓等, 1989, 1996;徐晓春等, 2000, 2002),如桃子窝、西岭、塌山等。此类锡矿受火山盆地控制,主要产在火山穹窿顶部的熔结凝灰岩和角砾岩中。桃子窝锡矿位于粤东紫金县境内,处于曾公嶂火山盆地南缘,赋矿围岩为流纹质含砾凝灰岩、晶屑凝灰岩和熔结凝灰岩(高凤颖, 2007)。受粤东地区研究程度的限制,对此类锡矿的特征及矿床成因、勘查模型的研究极其滞后,造成区内找矿勘查工作一直未取得重大突破。粤东地区位于东南沿海火山岩带的西南缘,目前一般认为东南沿海火山盆地形成于白垩纪,但是,这些研究主要集中在闽浙地区,前人对粤东地区的研究集中在上世纪90年代(岳书仓等, 1989, 1996;徐晓春, 1993),受测试技术方法的限制,岩浆活动时代误差较大,区内精确的岩浆-成矿事件年代学格架亟待厘定。本文对桃子窝锡矿区火山-次火山岩、侵入岩的锆石进行了U-Pb定年,为建立粤东地区岩浆-成矿事件年代学格架提供可靠资料,并通过锆石Lu-Hf同位素研究,结合前人研究成果,浅析火山岩-次火山岩与锡的成矿关系以及火山-侵入岩形成的构造环境。

1 区域地质背景

粤东处于东南沿海火山岩带与南岭花岗岩带复合部位。区内发育NE向莲花山断裂带,由丰顺-海丰、普宁-潮州、惠来-饶平3条NE向断裂组成。火山、次火山-侵入杂岩沿3条断裂大面积出露(图1),锡、铜多金属矿床与之伴生(郭锐等, 2006),被称为莲花山锡矿带。桃子窝锡多金属矿位于莲花山断裂带北部中段,处于松坑向斜的西翼,曾公嶂火山岩盆地南缘(高凤颖, 2007)。区内出露地层主要为上三叠统小坪组、下侏罗统金鸡组、中侏罗统漳平组 and 上侏罗统高基坪组。小坪组为一套滨浅海相砂页岩组合,岩性为细砂岩、泥质粉砂岩和砂质页岩。金鸡组为浅变质粉砂岩。漳平组为一套夹有火山碎屑岩的变质砂岩。高基坪组为一套陆相火山碎屑岩,岩性主要为流纹质凝灰岩、熔结凝灰岩、晶屑凝灰岩和含砾流纹岩。区内断裂以近EW向为主,其次为NNE向。近EW向断裂穿过矿区,位于火山盆地的南边

缘,倾向NE 25°,倾角较陡,具有多阶段活动特征(高凤颖, 2007)。沿断裂充填有黑云母花岗岩脉,断裂北盘为高基坪组火山岩和近东西展布的次花岗斑岩体。区内出露大面积火山-次火山岩、花岗质侵入岩。矿区北部的曾公嶂火山盆地内出露高基坪组流纹质凝灰岩、熔结凝灰岩和晶屑凝灰岩。次花岗斑岩出露在矿区南部,呈近东西向展布,处于火山盆地中的次花岗斑岩与火山岩呈过渡接触,界线不清楚。石英闪长岩位于矿区北部和南部。花岗岩与小坪组砂页岩接触带部位呈侵入接触关系,沿接触带岩体呈近东西向不规则带状展布(图2)。

2 样品特征及测试方法

2.1 样品特征

为了研究矿区火山-次火山岩、侵入岩与锡矿成矿关系,探讨区内岩浆活动的构造环境,本文采集了桃子窝矿区3种不同岩性的火成岩样品,分别对其进行锆石U-Pb年龄的测定以及Hf同位素特征分析。3个样品均取自桃子窝锡矿区ZK601中,次花岗斑岩(TZW0527001)、晶屑凝灰岩(TZW0527002)和细粒花岗岩(TZW0527003)自上而下分布。次花岗斑岩位于ZK601孔深5~46 m处,晶屑凝灰岩位于ZK601孔深224~250 m,细粒花岗岩位于ZK601孔深480~498 m,3个样品分别取自孔深41、234和490 m处,其中次花岗斑岩与晶屑凝灰岩间夹有厚达100多米的中侏罗世砂岩,而晶屑凝灰岩与细粒花岗岩之间也夹有较厚的中侏罗世砂岩,两者呈侵入接触关系。

次花岗斑岩(TZW0527001):呈浅灰色,斑状结构,块状构造(图3a)。斑晶成分主要为石英(35%)、长石(20%)。石英斑晶呈他形-半自形,边部可见溶蚀现象。长石呈半自形-自形,强烈绢云母化,局部可见长石碎屑。萤石呈半自形-自形粒状产于晶洞中,与石英共生。基质主要由长石和石英组成,呈显微晶质结构,基质发育强烈绢云母化和粘土化(图3b、3c)。

晶屑凝灰岩(TZW0527002):为中侏罗统漳平组火山碎屑岩,呈灰白色,晶屑凝灰结构,块状构造(图3d)。岩石主要由晶屑、火山灰、少量玻屑组成。晶屑含量约45%,晶屑成分以石英、长石为主,少量为白云母。石英呈次棱角状,粒径为0.1~0.5 mm,部分溶蚀呈港湾状;长石多已强烈蚀变为绢云母,长石

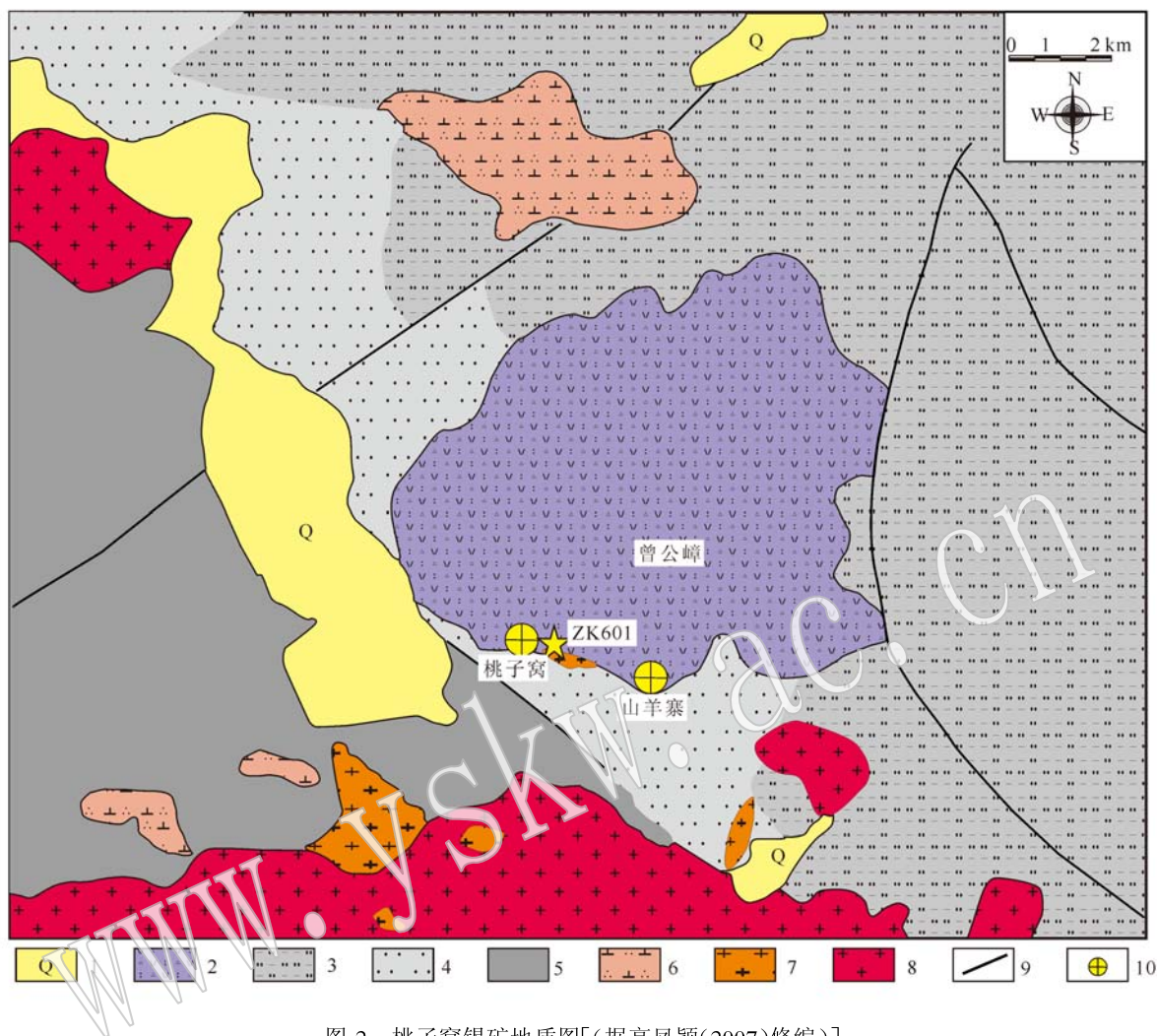


图2 桃子窝锡矿地质图[据高凤颖(2007)修编]

Fig. 2 Geological sketch map of the Taoziwo tin deposit (modified from Gao Fengying, 2007)

1—第四系; 2—中晚侏罗世火山岩; 3—中侏罗世泥质砂岩; 4—早三叠世砂岩; 5—泥盆-石炭纪地层; 6—石英闪长岩; 7—次花岗斑岩; 8—花岗岩; 9—断裂; 10—锡矿

1—Quaternary; 2—Middle-Late Jurassic volcanic rocks; 3—Early-Middle Jurassic argillaceous sandstone; 4—Early Triassic sandstone;

5—Devonian-Carboniferous strata; 6—quartz diorite; 7—subgranite porphyry; 8—granite; 9—fault; 10—tin deposit

边部呈阶梯状; 白云母呈长板状, 干涉色为二级红黄, 由长石蚀变而来(图 3e)。玻屑一般细小, 粒径多小于 0.1 mm, 呈骨针状、弧面棱角状, 晶屑和玻屑被火山灰所胶结(图 3e、3f)。

细粒花岗岩(TZW0527003): 呈灰色, 粒状结构, 块状构造(图 3g)。主要成分为石英(55%~40%)、碱性长石(25%~20%)、斜长石(10%~5%)、少量黑云母、角闪石(5%), 副矿物为锆石和磷灰石。石英呈半自形-他形粒状, 粒径为 0.3~0.8 mm。斜长石呈半自形-自形, 粒径为 0.1~0.3 mm, 发育聚片双晶。碱性长石为钾长石和微斜长石, 呈半自形-自

形, 粒径为 0.08~0.2 mm, 钾长石发育卡式双晶, 多已发生蚀变, 表面粘土化、绢云母化发育强烈, 微斜长石格子双晶发育, 多已发生粘土化。黑云母呈细粒鳞片状集合体产出, 呈长板状, 粒径为 0.05~0.2 mm, 局部发育绿泥石化。角闪石呈半自形-自形产出, 粒径约 0.3~0.5 mm, 角闪石蚀变为方解石和绿帘石(图 3h、3i)。

2.2 测试方法

锆石挑选在廊坊市宏信地质勘查服务技术公司完成, 将所测样品粉碎并按重力和电磁选方法分选出锆石, 在双目镜下选出晶形较好、透明度高的锆石

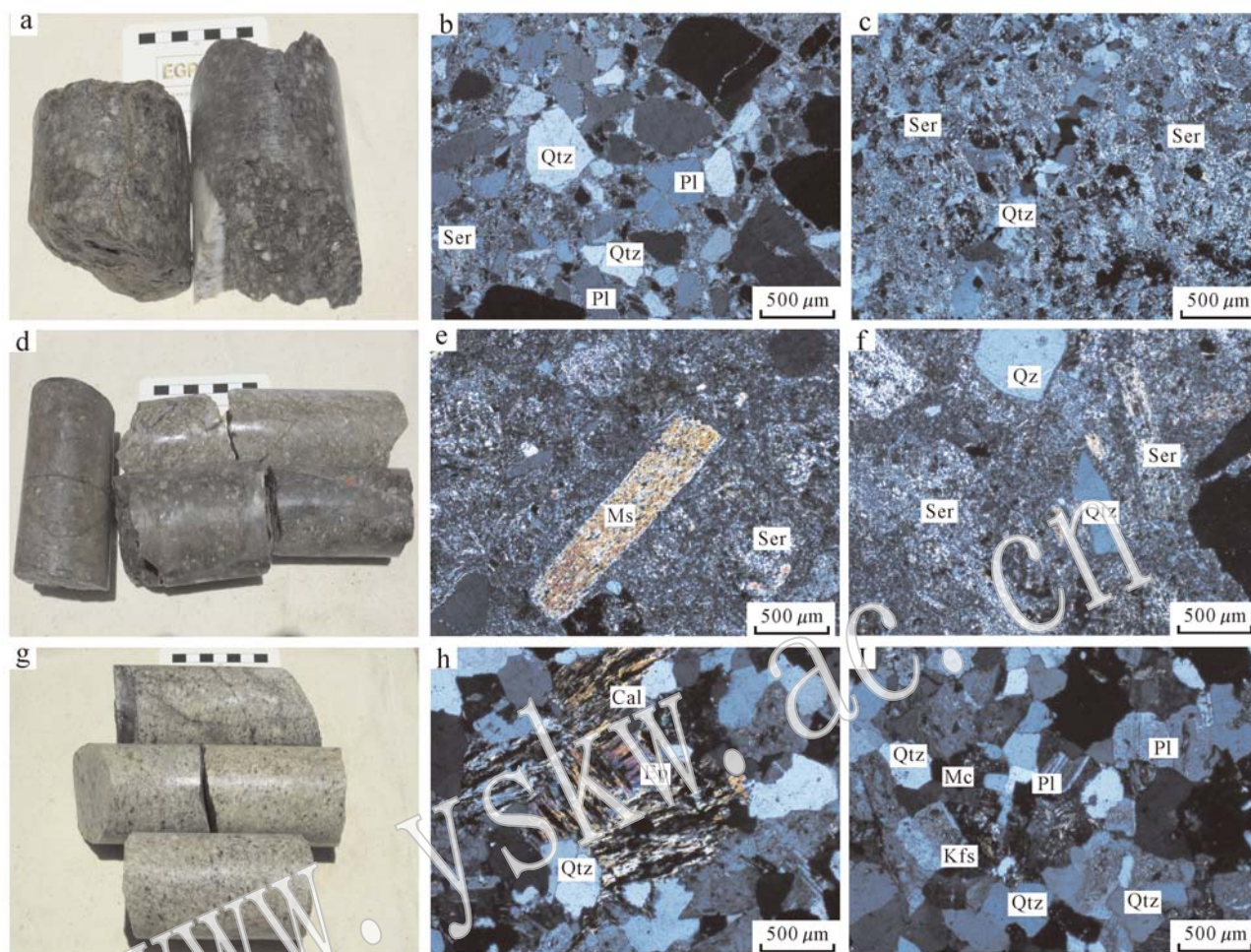


图3 桃子窝锡矿火山-次火山岩、花岗岩手标本和显微镜下照片(正交偏光)

Fig. 3 Samples and microphotographs of the volcanic-subvolcanic rock, granite in Taoziwo tin deposit (crossed polarized light)

a—次花岗斑岩; b—次花岗斑岩, 绢云母化; c—次花岗斑岩, 长石蚀变为绢云母; d—晶屑凝灰岩; e—晶屑凝灰岩, 长石蚀变为白云母和绢云母; f—晶屑凝灰岩中的石英和绢云母; g—细粒花岗岩; h—细粒花岗岩, 角闪石蚀变为绿帘石和方解石; i—细粒花岗岩中斜长石、微斜长石、钾长石和石英; Bt—黑云母; Cal—方解石; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Mc—微斜长石; Ms—白云母; Kfs—钾长石; Pl—斜长石;

Qz—石英; Ser—绢云母

a—subgranite porphyry; b—subgranite porphyry, sericitization; c—subgranite porphyry, plagioclase has been altered to sericite; d—crystal tuff; e—crystal tuff, plagioclase has been altered to muscovite and sericite; f—quartz and sericite in crystal tuff; g—fine-grained granite; h—fine-grained granite, amphibole has been altered to epidote and calcite; i—plagioclase, microcline, K-feldspar and quartz in fine-grained granite; Bt—biotite;

Cal—calcite; Chl—chlorite; Ep—epidote; Mc—microcline; Ms—muscovite; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Qz—quartz; Ser—sericite

颗粒, 然后将其粘贴在环氧树脂表面制靶, 抛光后用于透射光、放射光和阴极发光显微照相。锆石阴极发光(CL)照相在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室扫描电子显微镜上完成。锆石 U-Pb 定年在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部与资源评价重点实验室完成, 所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀斑束直径为 30 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/cm², 以 He 为载气。

LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采用单点剥蚀的方式, 锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, 测试过程中每测定 5 个样品前后重复测定 2 个锆石 GJ-1 对样品进行校正, 并测定 1 个锆石 Plesovice, 观察仪器的状态和测试的重现性。具体测试流程及数据采集分析过程见文献(侯可军等, 2009)。数据处理采用 ICPMSData-Cal 程序, 锆石年龄谱和图用 Isoplot 3.0 程序获得。

锆石原位 Hf 同位素测试在中国科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验

室的 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行,采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径为 40 μm ,采用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点位于同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\,013 \pm 13$ (2σ , $N=10$),与文献报道值(侯可军等,2007)在误差范围内一致。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

样品中锆石结晶较好,呈典型的柱状,自形-半自形。粒径一般长约 100~200 μm ,宽 80~100 μm ,长宽比为 1:1~2:1。阴极发光(CL)照片显示锆石具有典型的岩浆震荡韵律环带,具有岩浆锆石特征(图4)。锆石 Th、U 含量分别介于 $83 \times 10^{-6} \sim 1\,344 \times 10^{-6}$ 、 $164 \times 10^{-6} \sim 2\,358 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值介于 0.15~1.50 之间,平均值为 0.51,大于 0.4,指示其为岩浆成因锆石。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试结果见表 1。对次花岗斑岩样品(TZW0527001)中 30 颗锆石进行了 30 个点测试分析,在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和年龄图上,大部分测点分布于谐和

线附近。其中 2 个点为无效点,是由于实验过程信号过低所致;8 个点出现不同方向偏离,谐和度低于 90%,可能是发生了 Pb 丢失所致。在加权平均年龄计算中剔除这 10 个点后,获得 20 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 172.1 ± 1.1 Ma (1σ , MSWD = 0.44)(图5)。对晶屑凝灰岩样品(TZW0527002)中 30 颗锆石进行了 30 个点测试分析,在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和年龄图上,大部分测点分布于谐和线附近,其中 4 个点出现不同方向偏离,谐和度低于 90%,可能是发生了 Pb 丢失所致,在加权平均年龄计算中剔除后,获得 26 颗锆石样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 171.8 ± 0.9 Ma (1σ , MSWD = 1.2)(图5)。对细粒花岗岩样品(TZW0527003)中 30 颗锆石进行了 30 个点测试分析,在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和年龄图上,大部分测点分布于谐和线附近,其中 1 个点为无效点,是由于实验过程中信号过低,9 个点出现不同方向偏离,谐和度低于 90%,可能是发生了 Pb 丢失所致,在加权平均年龄计算中剔除后,获得 20 颗锆石样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 168.9 ± 1.5 Ma (1σ , MSWD = 1.5)(图5)。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石 Hf 同位素分析结果列于表 2。次花岗斑岩样品(TZW0527001)多数测试点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ 和 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $0.282\,270 \sim 0.282\,480$ 和 $-13.96 \sim -6.54$,



图4 桃子窝锡矿火山-次火山岩、花岗岩锆石阴极发光图

Fig. 4 Zircon CL images of the volcanic-subvolcanic rock and granite in the Taoziwo tin deposit

表 1 桃子窝锡矿火山-次火山岩、花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 1 LA-ICPMS zircon U-Pb data of the volcanic-subvolcanic rock and granite in the Taoziwo tin deposit

测试 点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	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
次花岗斑岩(TZW0527001)													
1	342	1 196	0.29	0.052 1	0.002 0	0.193 8	0.007 4	0.026 9	0.000 3	179.9	6.3	171.1	2.2
2	101	227	0.44	0.099 0	0.006 0	0.370 7	0.022 6	0.027 0	0.000 3	320.2	16.7	171.6	2.8
3	457	1 040	0.44	0.051 5	0.001 8	0.193 0	0.006 7	0.027 1	0.000 3	179.2	5.7	172.1	1.7
4	474	546	0.87	0.051 2	0.002 5	0.187 8	0.008 8	0.026 8	0.000 4	174.7	7.5	170.4	2.6
5	348	1 068	0.33	0.049 8	0.001 7	0.185 7	0.006 4	0.027 1	0.000 3	173.0	5.5	172.2	2.0
6	259	854	0.30	0.050 0	0.002 2	0.183 9	0.007 8	0.026 7	0.000 3	171.4	6.7	169.7	2.1
7	294	406	0.72	0.047 3	0.002 9	0.172 0	0.010 1	0.026 6	0.000 4	161.1	8.8	169.4	2.4
8	166	195	0.85	0.110 3	0.008 6	0.429 5	0.037 8	0.027 6	0.000 7	362.8	27	175.2	4.2
9	233	542	0.43	0.055 9	0.005 1	0.195 4	0.017 2	0.025 4	0.000 6	181.2	14.6	161.6	3.5
10	417	464	0.90	0.052 3	0.003 6	0.190 5	0.013 0	0.026 5	0.000 5	177.1	11.1	168.7	3.2
11	167	438	0.38	0.057 2	0.007 6	0.203 0	0.024 3	0.027 1	0.001 0	187.7	20.5	172.6	6.1
12	387	1 599	0.24	0.050 7	0.005 0	0.192 6	0.018 8	0.027 6	0.000 8	178.8	16.0	175.7	4.8
13	1 344	898	1.50	0.050 7	0.002 0	0.188 9	0.007 6	0.027 1	0.000 3	175.7	6.5	172.1	2.0
14	328	799	0.41	0.049 1	0.002 1	0.182 8	0.007 4	0.027 2	0.000 3	170.5	6.3	172.8	2.0
15	392	835	0.47	0.054 4	0.002 5	0	0	0	0	0	0	0	0
16	211	1 386	0.15	0.053 8	0.002 2	0.197 1	0.006 7	0.026 9	0.000 4	182.7	5.7	171.4	2.6
17	349	911	0.38	0.054 2	0.002 8	0.202 9	0.010 2	0.027 2	0.000 5	187.6	8.6	172.7	3.1
18	633	620	1.02	0.063 6	0.002 9	0.239 2	0.009 6	0.027 8	0.000 4	217.8	7.8	177.0	2.79
19	335	564	0.59	0.051 7	0.002 4	0.194 0	0.008 6	0.027 3	0.000 4	180.1	7.3	173.4	2.4
20	526	524	1.00	0.055 3	0.002 6	0.205 0	0.009 5	0.027 2	0.000 4	190.2	8.0	172.7	2.5
21	301	445	0.68	0.051 6	0.002 5	0	0	0	0	0	0	0	0
22	727	2 359	0.31	0.050 9	0.003 5	0.217 9	0.014 0	0.031 2	0.000 7	200.1	11.7	197.8	4.2
23	478	1 296	0.37	0.050 0	0.001 8	0.188 1	0.006 4	0.027 4	0.000 4	175.0	5.5	174.4	2.3
24	294	765	0.38	0.049 4	0.002 7	0.185 6	0.010 1	0.027 6	0.000 5	172.8	8.7	175.3	3.2
25	321	1 051	0.30	0.055 4	0.003 4	0.210 8	0.013 9	0.027 6	0.000 8	194.3	11.6	175.3	5.0
26	842	1 935	0.44	0.049 4	0.002 5	0.186 0	0.009 3	0.027 2	0.000 3	173.2	8.0	173.2	1.9
27	118	254	0.47	0.053 9	0.005 0	0.230 3	0.020 4	0.031 1	0.000 6	210.5	16.8	197.7	4.0
28	89	150	0.60	0.123 6	0.012 2	0.606 0	0.069 0	0.034 4	0.001 0	481.0	43.6	218.3	6.3
29	320	434	0.74	0.052 3	0.003 0	0.223 0	0.013 0	0.031 1	0.000 5	204.4	10.8	197.3	3.3
30	372	800	0.47	0.051 2	0.001 9	0.191 4	0.008 0	0.027 1	0.000 5	177.8	6.8	172.3	3.4
晶屑凝灰岩(TZW0527002)													
1	325	738	0.44	0.046 7	0.002 0	0.174 4	0.007 8	0.027 0	0.000 3	163.2	6.7	171.5	2.0
2	886	987	0.90	0.046 9	0.002 0	0.170 6	0.007 2	0.026 4	0.000 3	159.9	6.3	168.0	1.9
3	289	905	0.32	0.053 1	0.001 8	0.199 5	0.006 3	0.027 3	0.000 3	184.7	5.3	173.7	2.0
4	431	912	0.47	0.050 3	0.001 9	0.186 5	0.006 9	0.026 9	0.000 3	173.6	5.9	171.4	1.8
5	203	471	0.43	0.052 2	0.002 5	0.195 9	0.008 9	0.027 3	0.000 3	181.6	7.6	173.5	2.2
6	290	681	0.43	0.050 4	0.002 4	0.183 5	0.008 5	0.026 4	0.000 3	171.1	7.3	168.2	2.0
7	336	775	0.43	0.050 1	0.002 0	0.186 1	0.007 1	0.027 1	0.000 3	173.3	6.1	172.4	2.1
8	197	841	0.23	0.046 6	0.001 5	0.174 4	0.005 6	0.027 1	0.000 3	163.2	4.9	172.5	1.8
9	260	578	0.45	0.050 2	0.002 6	0.183 0	0.008 9	0.026 8	0.000 4	170.6	7.6	170.7	2.4
10	196	474	0.41	0.049 3	0.002 9	0.182 8	0.010 2	0.027 3	0.000 4	170.5	8.7	173.4	2.4
11	312	610	0.51	0.051 0	0.002 2	0.188 6	0.007 7	0.027 0	0.000 3	175.5	6.6	171.8	2.1
12	287	429	0.67	0.051 4	0.003 1	0.194 3	0.011 5	0.027 6	0.000 4	180.3	9.8	175.5	2.6
13	137	225	0.61	0.050 0	0.007 6	0.200 6	0.027 3	0.029 8	0.001 0	185.6	23.1	189.1	6.0
14	419	774	0.54	0.049 1	0.002 0	0.181 8	0.007 0	0.027 1	0.000 3	169.6	6.0	172.3	2.1
15	444	1 176	0.38	0.046 5	0.001 5	0.173 5	0.005 7	0.027 1	0.000 4	162.4	5.0	172.7	2.2
16	366	675	0.54	0.048 9	0.002 1	0.180 5	0.007 8	0.026 8	0.000 3	168.5	6.7	170.8	2.1

续表 1

Continued Table 1

测试 点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
17	175	472	0.37	0.047 2	0.002 5	0.173 6	0.008 4	0.027 0	0.000 4	162.5	7.3	171.5	2.3
18	331	571	0.58	0.046 9	0.002 2	0.173 5	0.007 6	0.027 0	0.000 4	162.4	6.6	171.6	2.6
19	163	410	0.40	0.075 7	0.003 7	0.295 3	0.015 7	0.028 0	0.000 4	262.8	12.3	177.9	2.8
20	202	392	0.52	0.046 4	0.002 3	0.174 1	0.008 5	0.027 6	0.000 4	163.0	7.3	175.8	2.6
21	411	966	0.43	0.046 5	0.001 7	0.171 3	0.006 2	0.026 8	0.000 4	160.5	5.4	170.4	2.3
22	317	909	0.35	0.049 9	0.001 9	0.187 2	0.006 1	0.027 6	0.000 3	174.3	5.3	175.5	2.1
23	299	682	0.44	0.046 1	0.002 3	0.167 8	0.008 1	0.026 4	0.000 3	157.5	7.1	167.7	1.9
24	374	651	0.57	0.052 2	0.005 7	0.183 6	0.014 5	0.026 4	0.000 4	171.2	12.5	168.0	2.6
25	322	691	0.47	0.049 7	0.001 9	0.182 6	0.006 7	0.026 9	0.000 4	170.3	5.8	170.9	2.4
26	473	787	0.60	0.047 3	0.001 8	0.180 4	0.007 1	0.027 7	0.000 3	168.4	6.1	175.9	1.8
27	339	1025	0.33	0.045 8	0.001 7	0.168 1	0.006 3	0.026 8	0.000 3	157.8	5.5	170.8	2.0
28	118	270	0.44	0.057 6	0.007 1	0.229 0	0.026 2	0.029 2	0.000 9	209.5	21.7	185.3	5.6
29	103	201	0.51	0.071 6	0.006 8	0.286 8	0.026 8	0.029 1	0.000 8	256.1	21.2	184.7	4.8
30	584	1 090	0.54	0.048 5	0.001 5	0.180 3	0.005 7	0.027 0	0.000 3	168.3	4.9	171.9	1.7
细粒花岗岩(TZW0527003)													
1	336	572	0.59	0.049 2	0.005 6	0.169 6	0.017 5	0.025 9	0.000 6	159.1	15.2	159.3	3.8
2	527	547	0.96	0.047 7	0.004 8	0.176 4	0.019 4	0.026 4	0.000 8	164.9	16.7	167.9	5.0
3	194	414	0.47	0.047 7	0.005 1	0.154 0	0.015 3	0.023 4	0.000 6	145.5	14.4	149.0	3.9
4	539	990	0.54	0.049 7	0.002 7	0.180 4	0.005 6	0.026 3	0.000 4	168.4	8.3	167.3	2.6
5	176	307	0.57	0.053 2	0.005 9	0.192 9	0.020 9	0.026 7	0.000 8	179.1	17.8	169.8	5.0
6	373	715	0.52	0.047 7	0.003 2	0.172 0	0.010 5	0.026 4	0.000 5	161.1	9.1	167.8	3.2
7	258	573	0.45	0.099 8	0.010 3	0.367 6	0.040 1	0.026 0	0.000 4	317.9	29.7	165.3	2.7
8	387	693	0.55	0.054 7	0.003 5	0.201 0	0.010 2	0.027 1	0.000 5	185.9	8.7	172.1	3.1
9	259	453	0.56	0.050 2	0.003 7	0.180 5	0.013 6	0.026 1	0.000 5	168.5	11.7	166.1	3.0
10	381	755	0.50	0.049 4	0.003 4	0.176 7	0.011 8	0.026 1	0.000 9	165.2	10.2	166.0	5.7
11	201	515	0.39	0.049 4	0.006 0	0.172 1	0.020 7	0.025 5	0.000 5	161.3	17.9	162.5	3.2
12	83	164	0.51	0.055 3	0.004 7	0.176 8	0.014 5	0.024 0	0.000 5	165.3	12.5	152.6	3.3
13	231	598	0.39	0.052 1	0.003 8	0.189 0	0.013 0	0.026 7	0.000 5	175.8	11.1	169.8	2.9
14	210	487	0.43	0.051 0	0.002 9	0.190 6	0.010 8	0.027 2	0.000 4	177.1	9.2	173.1	2.7
15	316	795	0.40	0.043 4	0.003 7	0.155 6	0.013 3	0.025 9	0.000 4	146.9	11.7	164.7	2.6
16	180	433	0.42	0.052 6	0.002 6	0.198 5	0.009 9	0.027 3	0.000 3	183.9	8.4	173.5	2.2
17	341	616	0.55	0.048 8	0.003 0	0.174 2	0.010 4	0.026 0	0.000 3	163.0	9.0	165.2	2.2
18	556	1 106	0.50	0.069 8	0.004 1	0.257 3	0.014 2	0.027 2	0.000 8	232.5	11.5	172.9	5.1
19	449	1 625	0.28	0.048 0	0.001 4	0	0	0	0	0	0	0	0
20	202.6	399	0.51	0.075 4	0.006 9	0.268 8	0.021 6	0.026 5	0.000 7	241.8	17.3	168.5	4.5
21	218	465	0.47	0.052 9	0.003 1	0.194 4	0.011 7	0.026 8	0.000 4	180.4	9.9	170.4	2.6
22	173	334	0.52	0.049 8	0.003 1	0.180 6	0.011 6	0.026 4	0.000 4	168.6	10.0	168.0	2.6
23	776	1 585	0.49	0.050 5	0.001 8	0.183 1	0.006 7	0.026 3	0.000 3	170.7	5.8	167.5	1.8
24	314	642	0.49	0.051 1	0.003 1	0.181 0	0.010 1	0.026 1	0.000 4	168.9	8.7	166.1	2.5
25	89	159	0.56	0.100 3	0.007 4	0.420 8	0.027 3	0.032 0	0.000 7	256.6	19.5	203.2	4.46
26	409	733	0.56	0.053 2	0.002 6	0.197 9	0.009 0	0.027 2	0.000 3	183.3	7.7	173.2	1.7
27	377	723	0.52	0.054 6	0.004 1	0.200 3	0.013 9	0.026 9	0.000 4	185.4	11.8	171.2	2.3
28	288	518	0.56	0.058 3	0.003 7	0.183 7	0.010 8	0.023 3	0.000 4	171.3	9.3	148.8	2.7
29	156	203	0.77	0.046 7	0.006 6	0.188 9	0.029 5	0.028 7	0.001 6	175.7	25.2	182.4	10.1
30	219	392	0.56	0.051 9	0.003 4	0.185 4	0.010 9	0.026 3	0.000 4	172.7	9.4	167.6	2.5

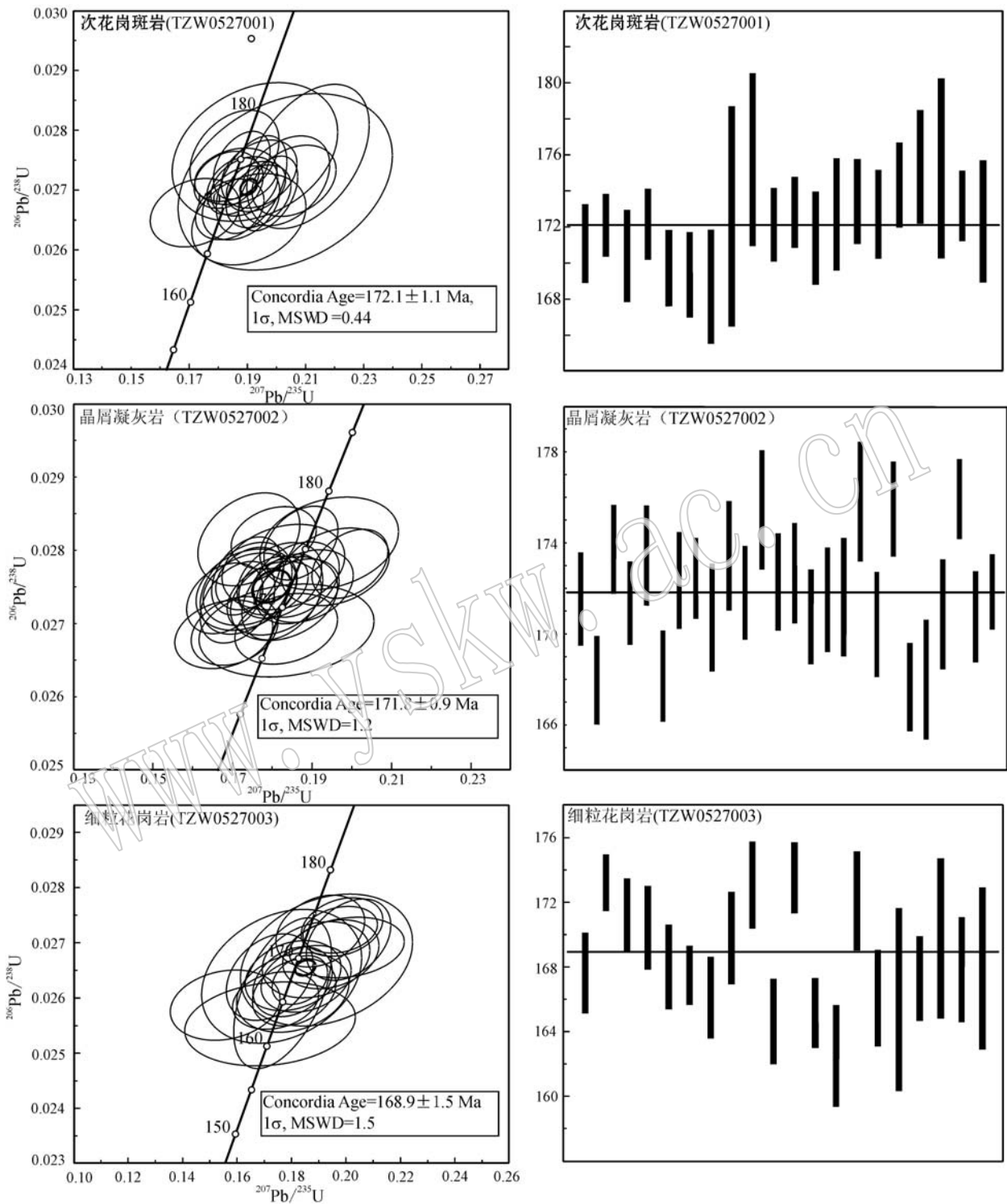


图5 桃子窝锡矿火山-次火山、花岗岩锆石 U-Pb 谐和年龄图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram for the volcanic-subvolcanic rock and granite in the Taoziwo tin deposit

平均值为0.282 366和-10.58,二阶段模式 t_{DM2} 年龄集中在1 633.8~2 102.5 Ma(图7a),平均值为1 889.4 Ma。另外,有3颗锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ 值

大于0.282 7, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值分布在6.66~9.53(图7b),单阶段模式年龄 t_{DM1} 为453.6~571.1 Ma,二阶段模式年龄 t_{DM2} 为609.6~795.5 Ma(图7a)。晶屑凝

表 2 桃子窝锡矿火山-次火山岩、花岗岩锆石 Hf 同位素年龄分析结果

Table 2 Hf isotopic data of zircon of the volcanic-subvolcanic rock and granite in the Taoziwo tin deposit

点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} (t)$	$\epsilon\text{Hf} (0)$	$\epsilon\text{Hf} (t)$	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
次花岗斑岩(TZW0527001)											
1	171.10	0.001 177	0.034 063	0.282 380	0.000 015	0.282 377	-13.85	-10.23	1 236.9	1 866.5	-0.964 54
3	172.12	0.001 284	0.038 980	0.282 341	0.000 014	0.282 337	-15.25	-11.62	1 296.2	1 955.1	-0.961 32
4	170.40	0.000 950	0.029 217	0.282 397	0.000 015	0.282 393	-13.28	-9.65	1 206.9	1 829.3	-0.971 40
5	172.17	0.000 805	0.024 398	0.282 384	0.000 012	0.282 381	-13.73	-10.04	1 220.1	1 855.7	-0.975 74
6	169.73	0.000 916	0.028 365	0.282 372	0.000 012	0.282 369	-14.14	-10.52	1 240.1	1 884.3	-0.972 40
7	169.38	0.000 978	0.030 915	0.282 362	0.000 013	0.282 359	-14.51	-10.91	1 256.6	1 908.1	-0.970 53
10	168.70	0.001 310	0.042 062	0.282 377	0.000 014	0.282 373	-13.95	-10.40	1 245.5	1 875.5	-0.960 55
11	172.62	0.001 167	0.032 736	0.282 484	0.000 016	0.282 480	-10.19	-6.54	1 091.0	1 633.8	-0.964 86
12	175.75	0.002 084	0.060 362	0.282 858	0.000 014	0.282 851	3.04	6.66	575.1	795.5	-0.937 24
13	172.14	0.002 319	0.074 928	0.282 278	0.000 015	0.282 270	-17.47	-13.96	1 424.0	2 102.5	-0.930 16
14	172.83	0.001 300	0.039 214	0.282 379	0.000 014	0.282 375	-13.90	-10.26	1 243.1	1 869.7	-0.960 85
15	171.40	0.000 699	0.022 429	0.282 356	0.000 011	0.282 354	-14.72	-11.04	1 255.5	1 918.0	-0.978 93
16	172.72	0.001 676	0.051 080	0.282 358	0.000 013	0.282 352	-14.66	-11.06	1 286.1	1 920.1	-0.949 52
20	172.72	0.001 083	0.033 245	0.282C393	0.000 012	0.282 390	-13.39	-9.72	1 215.5	1 835.7	-0.967 36
23	174.35	0.002 831	0.079 840	0.282 909	0.000 016	0.282 899	4.83	8.34	511.6	687.0	-0.914 74
24	175.35	0.001 387	0.050 152	0.2823 63	0.000 013	0.282 358	-14.47	-10.79	1 268.8	1 905.0	-0.958 23
25	175.27	0.001 746	0.052 469	0.282 338	0.000 013	0.282 332	-15.35	-11.71	1 316.4	1 962.7	-0.947 40
26	173.19	0.001 989	0.060 498	0.282 940	0.000 014	0.282 934	5.95	9.53	453.6	609.6	-0.940 08
30	172.33	0.002 463	0.088 415	0.282 365	0.000 014	0.282 357	-14.40	-10.90	1 303.1	1 909.0	-0.925 81
晶屑凝灰岩(TZW0527002)											
1	171.55	0.000 883	0.025 776	0.282 424	0.000 012	0.282 421	-12.32	-8.66	1 166.9	1 767.5	-0.973 40
2	167.97	0.001 299	0.039 823	0.282 317	0.000 014	0.282 312	-15.11	-12.57	1 330.9	2 011.9	-0.960 88
3	173.72	0.001 289	0.036 446	0.282 315	0.000 011	0.282 311	-16.15	-12.49	1 332.5	2 011.4	-0.961 16
4	171.36	0.001 492	0.042 733	0.282 301	0.000 012	0.282 297	-16.61	-13.06	1 359.3	2 045.0	-0.955 05
5	173.46	0.000 780	0.022 637	0.282 425	0.000 012	0.282 426	-12.14	-8.43	1 156.8	1 754.3	-0.976 51
6	168.16	0.001 003	0.030 994	0.282 436	0.000 012	0.282 433	-11.89	-8.31	1 153.6	1 743.1	-0.969 79
7	172.37	0.000 858	0.024 707	0.282 442	0.000 011	0.282 440	-11.65	-7.97	1 139.9	1 724.6	-0.974 16
8	172.46	0.001 384	0.038 568	0.282 326	0.000 012	0.282 321	-15.78	-12.15	1 320.8	1 988.9	-0.958 30
9	170.74	0.000 892	0.026 128	0.282 427	0.000 011	0.282 424	-12.19	-8.54	1 162.1	1 759.7	-0.973 12
10	173.44	0.000 973	0.028 548	0.282 468	0.000 012	0.282 465	-10.74	-7.04	1 107.1	1 666.8	-0.970 69
11	171.81	0.000 837	0.025 392	0.282 409	0.000 012	0.282 406	-12.85	-9.18	1 186.6	1 800.8	-0.974 78
12	175.47	0.001 308	0.038 799	0.282 358	0.000 013	0.282 354	-14.63	-10.94	1 272.5	1 914.4	-0.960 61
14	172.30	0.001 085	0.031 806	0.282 427	0.000 012	0.282 423	-12.21	-8.55	1 168.9	1 761.5	-0.967 32
15	172.68	0.000 912	0.026 025	0.282 459	0.000 011	0.282 456	-11.06	-7.37	1 117.9	1 686.9	-0.972 53
16	170.77	0.001 290	0.038 776	0.282 441	0.000 012	0.282 437	-11.70	-8.10	1 154.9	1 731.4	-0.961 16
17	171.51	0.001 269	0.037 417	0.282 459	0.000 014	0.282 455	-11.07	-7.45	1 129.2	1 691.2	-0.961 77
18	171.62	0.000 811	0.024 885	0.282 414	0.000 011	0.282 412	-12.66	-8.98	1 178.0	1 788.3	-0.975 58
20	175.82	0.001 011	0.030 213	0.282 437	0.000 013	0.282 433	-11.86	-8.12	1 152.6	1 736.5	-0.969 55
21	170.43	0.000 921	0.027 010	0.282 434	0.000 011	0.282 431	-11.96	-8.33	1 154.0	1 745.8	-0.972 25
22	175.50	0.001 111	0.032 929	0.282 323	0.000 011	0.282 320	-15.87	-12.15	1 314.8	1 991.0	-0.966 52
23	167.68	0.000 857	0.026 670	0.282 425	0.000 013	0.282 423	-12.26	-8.68	1 163.8	1 765.8	-0.974 20
24	168.01	0.000 966	0.027 528	0.282 361	0.000 012	0.282 358	-14.54	-10.96	1 257.2	1 910.4	-0.970 90
25	170.88	0.001 150	0.034 256	0.282 425	0.000 011	0.282 421	-12.28	-8.67	1 173.8	1 767.5	-0.965 36
26	175.94	0.001 283	0.038 217	0.282 439	0.000 013	0.282 435	-11.78	-8.07	1 157.8	1 733.3	-0.961 35
27	170.77	0.000 663	0.020 465	0.282 363	0.000 011	0.282 361	-14.47	-10.80	1 244.5	1 902.5	-0.980 04
30	171.87	0.001 136	0.032 754	0.282 334	0.000 011	0.282 330	-15.49	-11.85	1 300.9	1 969.8	-0.965 78
细粒花岗岩(TZW0527003)											
2	167.93	0.001 543	0.049 383	0.282 502	0.000 012	0.282 497	-9.56	-6.05	1 076.7	1 599.3	-0.953 51
4	167.31	0.000 878	0.027 623	0.282 480	0.000 011	0.282 478	-10.31	-6.74	1 087.4	1 642.7	-0.973 57
5	169.78	0.000 745	0.023 883	0.282 493	0.000 012	0.282 491	-9.85	-6.21	1 065.6	1 611.3	-0.977 55
6	167.84	0.000 978	0.030 881	0.282 500	0.000 011	0.282 497	-9.60	-6.03	1 062.2	1 598.1	-0.970 54
8	172.10	0.001 044	0.035 293	0.282 565	0.000 014	0.282 562	-7.32	-3.66	973.1	1 450.8	-0.968 54
9	166.09	0.000 742	0.023 246	0.282 488	0.000 013	0.282 485	-10.06	-6.49	1 073.5	1 626.3	-0.977 64
10	166.01	0.000 825	0.026 085	0.282 483	0.000 011	0.282 480	-10.23	-6.67	1 082.5	1 637.7	-0.975 15
11	162.52	0.000 684	0.021 080	0.282 478	0.000 012	0.282 476	-10.41	-6.92	1 085.7	1 650.5	-0.979 40
13	169.82	0.000 524	0.016 135	0.282 471	0.000 011	0.282 470	-10.63	-6.97	1 090.0	1 659.3	-0.984 21
14	173.08	0.000 678	0.021 510	0.282 477	0.000 010	0.282 475	-10.43	-6.71	1 086.6	1 645.6	-0.979 57
15	164.65	0.000 633	0.019 639	0.282 526	0.000 011	0.282 524	-8.70	-5.16	1 017.1	1 540.5	-0.980 93
16	173.54	0.000 784	0.024 598	0.282 476	0.000 011	0.282 474	-10.46	-6.74	1 090.7	1 647.8	-0.976 38
17	165.18	0.001 412	0.047 130	0.282 476	0.000 012	0.282 471	-10.48	-7.01	1 109.7	1 658.2	-0.957 46
21	170.44	0.000 724	0.023 725	0.282 537	0.000 012	0.282 535	-8.30	-4.64	1 003.8	1 512.3	-0.978 20
22	168.01	0.000 954	0.029 482	0.282 505	0.000 015	0.282 502	-9.45	-5.87	1 055.6	1 588.3	-0.971 26
23	167.51	0.001 281	0.043 374	0.282 480	0.000 012	0.282 476	-10.33	-6.79	1 099.8	1 646.4	-0.961 41
24	166.12	0.000 706	0.023 052	0.282 501	0.000 011	0.282 499	-9.59	-6.03	1 054.3	1 596.8	-0.978 73
25	173.23	0.001 145	0.039 630	0.282 526	0.000 012	0.282 522	-8.72	-5.05	1 031.5	1 539.8	-0.965 51
26	171.21	0.001 151	0.038 573	0.282 502	0.000 013	0.282 498	-9.55	-5.93	1 065.1	1 594.1	-0.965 34
30	167.64	0.000 672	0.022 695	0.282 475	0.000 011	0.282 473	-10.51	-6.91	1 089.5	1 653.9	-0.979 76

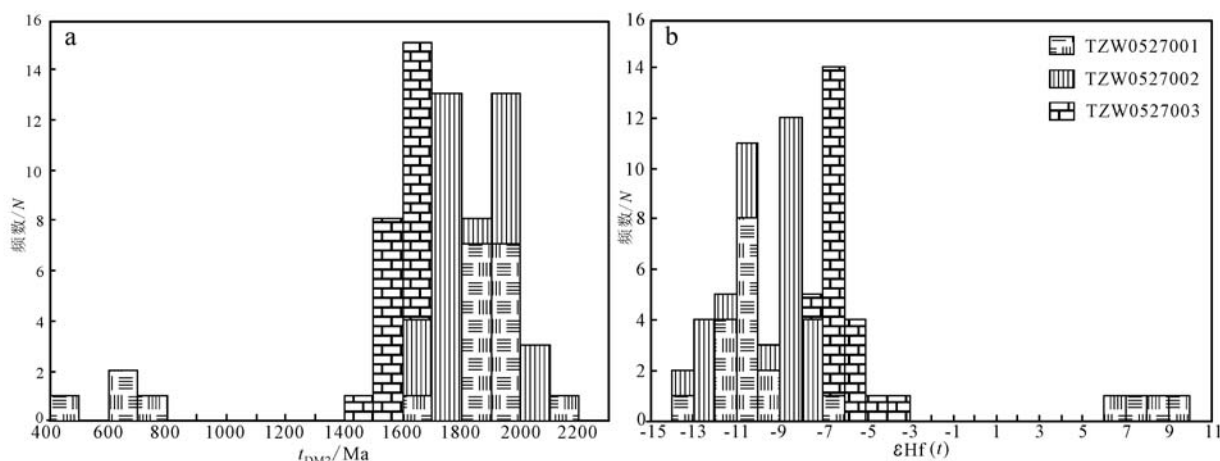


图6 桃子窝锡矿火山-次火山岩、花岗岩锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 和二阶段模式年龄(t_{DM2})分布图

Fig. 6 Zircon secondary model age and Hf isotopic compositions of the volcanic-subvolcanic rock and granite in the Taoziwo tin deposit

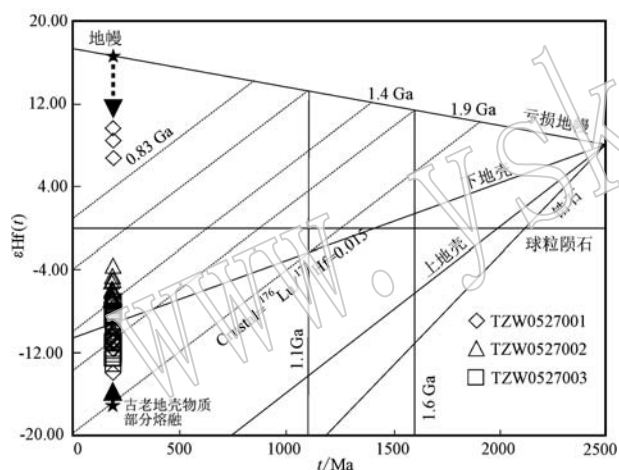


图7 桃子窝锡矿火山-次火山岩、花岗岩锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 对年龄图解

Fig. 7 $\epsilon\text{Hf}(t)$ versus U-Pb ages of zircon from the volcanic-subvolcanic rock and granite in the Taoziwo tin deposit

灰岩样品(TZW0527002)所测点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ 和 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值比较均一,分别为0.282 297~0.282 465和-13.06~-7.04,平均值为0.282 396和-9.52,二阶段模式年龄 t_{DM2} 为1 666.8~2 045.0 Ma(图7a),平均值为1 821.9 Ma。细粒花岗岩样品(TZW0527003)所测点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ 和 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值更加均一,分别为0.282 471~0.282 562和-7.01~-3.66,平均值为0.282 494和-6.31,二阶段模式年龄 t_{DM2} 为1 450.8~1 659.3 Ma(图7a),平均值为1 605.0 Ma。

4 讨论

4.1 岩石成因

锆石作为岩石中常见的稳定副矿物,不仅被广泛应用于U-Pb同位素定年,还由于其具有高的Hf含量和极低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值(通常小于0.002),形成之后几乎没有明显的放射成因Hf的积累和很高的Hf同位素体系封闭温度(高于U-Pb和Sm-Nd体系的封闭温度)使其保留有原始Hf同位素组成,而成为示踪其寄主岩源区属性、探讨母岩浆形成与演化 and 壳幔相互作用的重要媒介(吴福元等, 2007)。

3个样品的测点中, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值绝大多数小于0.002,介于0.000 52~0.002 83之间,平均值为0.001 13,显示较低的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值,表明锆石形成后具较低的放射性成因Hf的积累。2个火山-次火山样品中,除TZW0527001的3个测点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值大于0.282 7, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(6.66~9.53)大于0,其余测点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.282 27~0.282 48)均小于0.282 7, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(-13.96~-6.54)均小于0(图6b),在 $\epsilon\text{Hf}(t)$ - t 图解上,大多落在球粒陨石演化线之下(图7),而上述3个点落在球粒陨石演化线之上,指示桃子窝矿区火山-次火山岩主要来自于古老地壳部分熔融,还有新生地壳物质的加入。细粒花岗岩样品(TZW0527003) $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.282 471~0.282 562)小于0.282 7, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(-7.01~-3.66)

均小于 0, 平均值为 -6.31 , 在 $\epsilon\text{Hf}(t) - t$ 图解上, 均落在球粒陨石演化线之下(图 7), 指示桃子窝矿区花岗岩来自于古老地壳部分熔融。3 个样品的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 $-0.98421 \sim -0.91474$, 明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值(-0.34)和硅铝质地壳 $f_{\text{Lu/Hf}}$ (-0.72) (Amelin *et al.*, 1999), 所以样品二阶段模式年龄 t_{DM2} 更能反映桃子窝矿区花岗质岩浆从亏损地幔被抽取的时间或源岩在地壳的平均存留年龄。火山-次火山样品大多数点二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 $1633.8 \sim 2102.5$ Ma, 而上述 3 个点的二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 $609.6 \sim 795.5$ Ma(图 6a), 指示其可能来源于古元古代古老地壳部分熔融, 又有新元古代新生地壳物质的加入。花岗岩二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 $1450.8 \sim 1659.3$ Ma, 表明其主要来源于中元古代古老地壳部分熔融。

4.2 区域岩浆活动时代特征及动力学背景浅析

华南东南沿海分布着大面积火山岩, 陶奎元等(1988)对东南沿海中生代火山活动研究后认为, 东南沿海中生代火山活动起始于晚侏罗世, 白垩纪是其主要活动期, 呈现由内陆向沿海迁移规律。粤东地区早期有内陆向沿海迁移, 晚期似乎有向内陆迁

移的趋势, 东南沿海火山岩带总体呈自西向东迁移趋势。尹家衡等(1989)认为粤东地区中生代火山活动延续时间长, 从 170 Ma 到 80 Ma, 划分为 3 个旋回: 170~146、146~127、127~80 Ma。李坤英等(1990)认为东南沿海岩浆活动起始于 180 Ma, 结束于 75 Ma, 火山活动南北分区, 东西分带, 在时空上有明显的迁移趋势, 呈现出由西向东、由南向北多向迁移的特点。段政等(2013)通过对浙闽沿海中生代火山岩研究后认为, 东南沿海火山活动高峰期为 143~126 Ma, 火山活动存在由南西向北东迁移的趋势。最近, 对东南沿海火山-侵入岩带最新的锆石 U-Pb 年龄进行统计, 发现岩浆活动从 190~80 Ma, 呈 SW 至 NE 向展布, 且出现了 3 个峰值, 分别为 170~155 Ma、145~130 Ma 和 110~90 Ma(图 8a), 而粤东地区岩浆活动主要集中在 162~155 Ma 和 144~132 Ma 两个阶段(图 8b)。此次工作, 首次对区内火山岩、侵入岩采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 3 个样品中两个次火山岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 172.1 ± 1.1 Ma、 171.8 ± 0.9 Ma, 花岗岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 168.9 ± 1.5 Ma(图 5), 两者可能为同一岩浆事件不同阶段的产物, 表明与桃

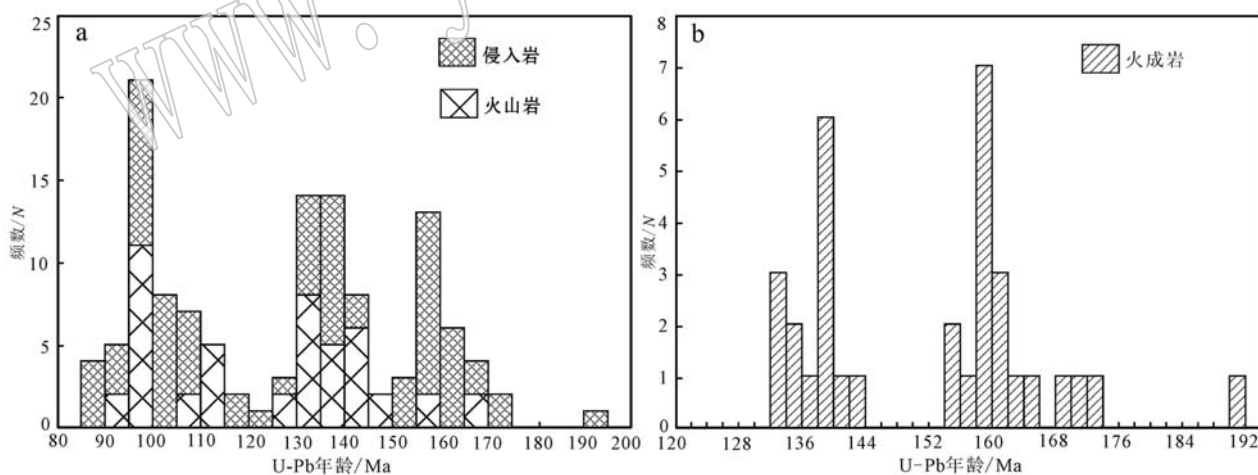


图 8 东南沿海侵入岩-火山岩(a)、粤东火成岩(b)锆石 U-Pb 年龄分布图

Fig. 8 Zircon U-Pb ages of intrusive-volcanic rocks along the southeastern coastal area of China (a) and igneous rocks in eastern Guangdong Province (b)

数据来源: 毛建仁等(2004, 2006)、赵希林等(2008)、邢光福等(2009)、李良林等(2011, 2013)、胡春杰等(2012)、肖爱芳等(2012)、张承帅等(2012)、Guo 等(2012)、段政等(2013)、Huang 等(2013)、Liu 等(2013)、陈润生等(2013)、李斌等(2013)、王对兴等(2013)、Chen 等(2014)、刘鹏等(2015 未刊)、本文

Data source: Mao Jianren *et al.*, 2004, 2006; Zhao Xilin *et al.*, 2008; Xing Guangfu *et al.*, 2009; Li Lianglin *et al.*, 2011, 2013; Hu Chunjie *et al.*, 2012; Xiao Aifang *et al.*, 2012; Zhang Chengshuai *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2012; Duan Zheng *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2013; Chen Runsheng *et al.*, 2013; Li Bin *et al.*, 2013; Wang Duixing *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014; Liu Peng *et al.*, in press; this paper

子窝锡矿成矿有关的岩浆活动时间为中侏罗世,早于东南沿海闽浙地区。

粤东地区处于华南板块的东南缘,处于东南沿海火山岩带与南岭花岗岩带复合部位,研究其中生代构造环境及动力学机制对研究华南乃至整个欧亚大陆中生代构造演化都具有重要意义。不同学者对华南中生代构造-岩浆-成矿事件建立了不同的动力模型(华仁民等, 2005; 毛建仁等, 2006; Li *et al.*, 2007; 舒良树, 2012)。目前,对华南地区中生代成岩成矿作用动力学背景的主要分歧在印支陆内造山后影响的时空范围、太平板块开始向欧亚大陆俯冲的时间以及俯冲方式的变化等。毛景文等(2009)通过对华南地区中生代主要金属矿床研究后认为,华南中生代矿床出现在 230~210、170~160、160~150 和 134~80 Ma 这 4 个阶段。170~160 Ma 成岩成矿事件是由于 180 Ma 左右 Izanagi 板块向欧亚大陆俯冲,于 170~160 Ma 期间发生俯冲板片多处撕裂,形成 I 同熔型斑岩铜矿。160~150 Ma 是由于俯冲板块开天窗,软流圈物质上涌到地壳形成壳幔源型高分异花岗质岩石。135 Ma 是由于俯冲板块改变了运动方向,由斜向俯冲调整到几乎平行大陆边缘的 NE 向走滑,造成大陆岩石圈大面积伸展,在东南沿海地区形成大量白垩纪断陷盆地和变质核杂岩,并伴随大规模火山活动和花岗质岩浆侵位。这种观点似乎能更好地解释东南沿海火山侵入岩带呈南西-北东迁移、演化规律。粤东发育多个白垩纪火山盆地(郭锐等, 2006),而曾公嶂火山盆地和桃子窝矿区火山-次火山岩、花岗岩形成于中侏罗世,早于东南沿海闽浙地区。粤东处于东南沿海火山-侵入岩带与南岭花岗岩带复合部位,岩浆活动兼具两者特征。因此,桃子窝矿区 170 Ma 左右的岩浆活动可能是太平洋板块向华南板块俯冲早期的产物,关于该地区详细的构造-岩浆事件以及岩浆演化序列的厘定,未来还需更加详细的岩石学、地球化学等工作来进一步探讨。

4.3 火山-次火山岩与锡矿关系

国外学者对与火山-次火山岩有关的锡矿已开展过系统的研究(Kelly and Turneure, 1970; Pol-lard *et al.*, 1987),一般认为此类锡矿受火山穹窿、火山盆地、火山口附近放射状断裂控制,主要产在火山穹窿顶部的熔结凝灰岩和凝灰岩砾岩中,或者产在火山口附近的断裂和角砾岩筒中(Ruiz and Kesler, 1980)。此类火山岩一般呈高钾钙碱性,具

准铝-过铝质特征,富集 Sn、U、Th、Rb、B、F,亏损 Ca、Mg、Ti、P、Co、Ni、Ba,具明显的 Eu 负异常,轻稀土元素相对富集, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.705~0.713,以上特征显示与锡矿有关的流纹质岩浆经历了高度的结晶分异过程(Tuta, 1988)。火山岩中发育多种副矿物,主要为镜铁矿、钛铁矿、黄玉、金红石、磷灰石、电气石、萤石,尤其是萤石(Huspeni and Tuta, 1984; Tuta, 1988),在此类火山岩中普遍发育,这是因为 F 在流纹质火山岩中富集,而 F 在岩浆中可以降低岩浆结晶温度,降低岩浆粘度,提高岩浆运移速率,最终提高岩浆分异程度,导致锡的富集成矿(Pollard *et al.*, 1987)。桃子窝锡矿受曾公嶂火山盆地控制,矿化呈浸染状产于火山-次火山岩中(图 9a、9b),火山-次火山岩中发育大量萤石,此外,锡石与金红石呈浸染状产于次花岗岩斑岩中(图 9c),这些特征均显示桃子窝锡矿与区内火山-次火山岩密切相关,是典型的火山-次火山岩型锡矿。

粤东地区锡矿类型与墨西哥西部和玻利维亚中南部锡矿类型相似,主要与火山-次火山岩有关,也发育少量与花岗岩有关的斑岩型锡矿。锡矿受火山盆地、火山穹窿、火山口附近放射状断裂及岩体内外接触带控制。粤东地区发育数十个火山岩盆地(郭锐等, 2006),其覆盖有熔结凝灰岩、流纹岩、含砾凝灰岩、火山角砾岩,这些火山-次火山岩分异程度高,富集 F、B 等元素(岳书仓等, 1989; 徐晓春等, 2000),均为此类锡矿典型的成矿岩体,在火山盆地边缘,发育有放射状断裂和角砾岩筒,均是形成此类锡矿的有利场所。

5 结论

(1) 桃子窝锡多金属矿床火山-次火山岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 172.1 ± 1.1 Ma 和 171.8 ± 0.9 Ma,花岗岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 168.9 ± 1.5 Ma,表明成岩时代为中侏罗世,早于东南沿海闽浙地区。

(2) 矿区内火山-次火山岩,大多数测点 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值均小于 0,只有 3 个点大于 0。 $\epsilon\text{Hf}(t)-t$ 图解上,除 3 个点落在球粒陨石演化线之上、二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 为 609.6~795.5 Ma, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值大多数点落在球粒陨石演化线之下,二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 为 1 633.8~2 102.5 Ma,指示火山-次火山岩主要来源于古元古代古老地壳部分熔融,又有新元古代新生

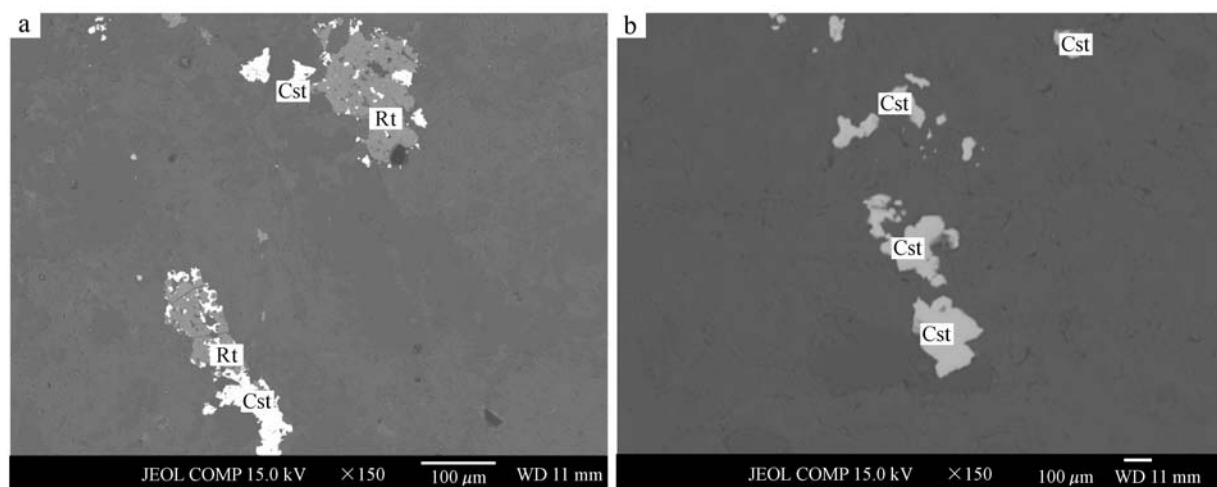


图9 桃子窝锡矿火山-次火山岩中锡石的背散射照片

Fig. 9 BSE image of the cassiterite in volcanic-subvolcanic rock in the Taoziwo tin deposit

a—次花岗斑岩中金红石和锡石共生; b—次花岗斑岩中锡石呈浸染状分布; Cst—锡石; Rt—金红石

a—rutile and cassiterite in subgranite porphyry; b—disseminated cassiterite in subgranite porphyry; Cst—cassiterite; Rt—rutile

地壳物质的加入。花岗岩 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值均小于0,在 $\epsilon\text{Hf}(t)-t$ 图解上,位于球粒陨石演化线之下,二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}2}$ 为1450.8~1659.5 Ma,指示桃子窝矿区花岗岩来自于中元古代古老地壳部分熔融。

(3) 桃子窝锡矿火山-次火山侵入杂岩是太平洋板块向华南海域俯冲早期的产物。

(4) 桃子窝锡矿与火山-次火山岩关系密切,是典型的火山-次火山岩型锡矿。

致谢 成文过程中得到了中国地质大学(北京)车合伟硕士研究生、梁亚运博士研究生的帮助;室内分析测试过程中,得到了中国地质科学院矿产资源研究所侯可军和郭春丽副研究员的大力支持和帮助;野外工作期间,得到了广东省有色金属地质局935队唐灵队长、周程林工程师以及广东省地质局、广东省地质调查院同行的大力支持和帮助;审稿专家对论文提出许多建设性建议,在此一并表示感谢!

References

- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, *et al.* 1999. Nature of the Earth's earliest crust from Hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 399: 252~255.
- Chen Jingyuan, Yang Jinhui, Zhang Jiheng, *et al.* 2014. Geochemical transition shown by Cretaceous granitoids in southeastern China: Implications for continental crustal reworking and growth[J]. *Lithos*, 196: 115~130.
- Chen Runsheng, Li Jianwei, Cao Kang, *et al.* 2013. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Shangfang tungsten deposit in Northern Fujian Province: Implications for regional mineralization [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(2): 289~304(in Chinese with English abstract).
- Duan Zheng, Xing Guangfu, Yu Minggang, *et al.* 2013. Time sequence and geological process of late Mesozoic volcanic activities in the area of Zhejiang-Fujian boundary[J]. *Geological Review*, 59 (3): 454~469(in Chinese with English abstract).
- Gao Fengying. 2007. Alteration features and prospecting direction of Taoziwo volcanic tin deposit in Guangdong Province[J]. *Express Information of Mining Industry*, 4: 79~81(in Chinese).
- Guo Feng, Fan Weiming, Li Chaowen, *et al.* 2012. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces[J]. *Lithos*, 150: 62~84.
- Guo Rui and Bu An. 2006. New discovery and understanding about seeking the copper-lead-zinc polymetal deposits in volcanic basin of east Guangdong[J]. *Mineral Resources and Geology*, 20(3): 243~246(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492(in Chinese with English abstract).

- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.*. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595 ~ 2 604(in Chinese with English abstract).
- Hu Chunjie, Huang Wenting, Bao Zhiwei, *et al.*. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the dacite porphyry from Zijinshan Cu-Au deposit and its metallogenetic implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 284 ~ 292(in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, *et al.*. 2005. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in Nanling Range[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 291 ~ 304(in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Chen Peirong, *et al.*. 2013. Relationship between Caledonian granitoids and large-scale mineralization in South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 19(1): 1 ~ 11(in Chinese with English abstract).
- Huang Huiqing, Li Xianhua, Li Zhengxiang, *et al.*. 2013. Intraplate crustal remelting as the genesis of Jurassic high-K granites in the coastal region of the Guangdong Province, SE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 280 ~ 302.
- Huspeni J R and Tuta Z. 1984. Petrology and geochemistry of rhyolites associated with tin mineralization in northern Mexico[J]. *Economic Geology*, 79: 87 ~ 105.
- Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Jiang Yaohui, *et al.*. 2006. New type of tin mineralization related to granite in South China: evidence from mineral chemistry, element and isotope geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2 509 ~ 2 516(in Chinese with English abstract).
- Kelly W C and Turneure F S. 1970. Mineralogy, Paragenesis and Geothermometry of the tin and tungsten deposits of the Eastern Andes, Bolivia[J]. *Economic Geology*, 65(6): 609 ~ 680.
- Li Bin, Zhao Kuidong, Yang Shuiyuan, *et al.*. 2013. Petrogenesis of the porphyritic dacite from Ermiaogou Cu-Au deposit in Zijinshan ore field and its metallogenetic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4 167 ~ 4 185(in Chinese with English abstract).
- Li Kunying, Shen Jialin, Wang Xiaoping, *et al.*. 1990. The isotopic geochronological research on Mesozoic volcanic-intrusive complex in the Southeastern coast of China[J]. *Bull. Nanjing Inse. Geol. M. R.*, Chinese Acad. Geol. Sci., 11(4): 45 ~ 57(in Chinese with English abstract).
- Li Lianglin, Zhou Hanwen, Chen Zhihua, *et al.*. 2011. Geochemical characteristics of granites in Taimushan area, Fujian Province, and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 593 ~ 609(in Chinese with English abstract).
- Li Lianglin, Zhou Hanwen, Chen Zhihua, *et al.*. 2013. Petrogenesis of the Late Mesozoic granitic rocks in southeast coastal areas of Fujian Province and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(7): 1 047 ~ 1 062(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, *et al.*. 2007. U-Pb Zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foudering of a subducted flat-slab? [J]. *Lithos*, 96: 186 ~ 204.
- Li Xianhua, Li Wuxian and He Bin. 2012. Building of the South China Block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: Observations, interpretations and tests[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(6): 543 ~ 559(in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Qiu Jiansheng and Li Zhen. 2013. Origin of mafic microgranular enclaves (MMES) and their host quartz monzonites from the Muchen Pluton in Zhejiang Province, Southeast China: Implications for magma mixing and crust-mantle interaction[J]. *Lithos*, 160: 145 ~ 163.
- Mao Jianren, Cheng Rong, Li Jiyu, *et al.*. 2006. Geochronology and geochemical characteristics of late Mesozoic granitic rocks from southwestern Fujian and their tectonic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1 723 ~ 1 734(in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren, Xu Naizheng, Hu Qing, *et al.*. 2004. The Mesozoic rock-forming and ore-forming processes and tectonic environment evolution in Shanghang-Datian region, Fujian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 285 ~ 296(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Chen Yanbo, *et al.*. 2009. Mineral deposit models of Mesozoic ore deposits in South China[J]. *Geological Review*, 55(3): 347 ~ 354(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, *et al.*. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 329 ~ 2 338(in Chinese with English abstract).
- Pollard P J, Pichavant M and Charoy B. 1987. Contrasting evolution of fluorine-and boron-rich tin system[J]. *Mineralium Deposita*, 22: 315 ~ 321.

- Ruiz Joaquin and Kesler Stephen E. 1980. Geology and geochemistry of the Las Cuevas fluorite deposit, San Luis Potosi, Mexico[J]. *Economic Geology*, 75: 1 200~1 209.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1 035~1 053(in Chinese with English abstract).
- Tao Kuiyuan, Xie Jiaying, Ruan Honghong, *et al.* 1988. Characteristics of the Mesozoic volcanism in the coastal margin of Southeastern China[J]. *Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci.*, 9(4): 12~28(in Chinese with English abstract).
- Tuta Z H. 1988. Geochronology of Mercury, tin and fluorine mineralization in northern Mexico[J]. *Economic Geology*, 83: 1 931~1 942.
- Wan Tianfeng and Zhao Qingle. 2012. The origin of tectonic-magmatism in the East of China[J]. *Science China Press*, 42(2): 155~163(in Chinese).
- Wang Duixing, Li Chunlin, Gao Wanli, *et al.* 2013. Late Mesozoic magma mixing in eastern Zhejiang Province: Evidence from U-Pb Geochronology and geochemistry of Xiaojiang pluton in Xinchang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3 993~4 003(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Xiao Aifang, Li Guopeng and Liu Xiaoming. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for the volcanic rocks of the lower formation of the Shi-maoshan Group and evolution of the Cretaceous magmatism in the Zijinshan Cu-Au Orefield, Fujian Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 20(2): 285~296(in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu. 2000. Taiwan: A continental block drafting counter-clockwisely from Eastern Guangdong Province, China[J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 21(3): 157~165(in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu, Chen Rong, Yang Zhuliang, *et al.* 2009. Characteristics and tectonic setting of Late Cretaceous volcanic magmatism in the coastal Southeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 77~91(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun, Xie Qiaoping and Yue Shucang. 2000. Metallogenetic mechanism of Mesozoic metallic ore deposits in Eastern Guangdong area[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 23(1): 99~103(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun, Yue Shucang, Xie Qiaoping, *et al.* 2002. Geological characteristics and ore-control factors of copper deposits in Huilai, Eastern Guangdong[J]. *Mineral Deposits*, (21): 503~506(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun and Yue Shucang. 1993. The time-space relation and characteristics and forming physicochemical conditions of Mesozoic igneous rocks in Eastern Guangdong area[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 16(2): 121~127(in Chinese with English abstract).
- Yin Jiaheng, Huang Guangzhao, Xu Minghua, *et al.* 1989. Division and correlation of Mesozoic volcanic cycles in east Guangdong[J]. *Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci.*, 10(4): 16~28(in Chinese with English abstract).
- Yue Shucang, Lei Xinyong, Gong Changru, *et al.* 1989. Geochemical studies on tin and tungsten deposits and granitoid in Eastern Guangdong[J]. *Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R., Chinese Acad. Geol. Sci.*, 10(1): 27~41(in Chinese with English abstract).
- Yue Shucang and Xu Xiaochun. 1996. Tectonic background and evolution of Mesozoic magmatism, Eastern Guangdong[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 19(1): 127~134(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengshuai, Su Huimin, Yu Miao, *et al.* 2012. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of Dayang-Juzhou granite in Longyan, Fujian Province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 225~242(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xilin, Mao Jianren, Chen Rong, *et al.* 2008. SHRIMP zircon dating of the Zijinshan pluton in southwestern Fujian and its implications[J]. *Geology in China*, 135(4): 590~597(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈润生, 李建威, 曹 康, 等. 2013. 闽北上房钨矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. *地质论评*, 38(2): 289~304.
- 段 政, 邢光福, 余明刚, 等. 2013. 浙闽边界区晚中生代火山作用时序与过程分析[J]. *地质论评*, 59(3): 454~469.
- 高凤颖. 2007. 广东紫金桃子窝火山岩锡矿蚀变特征及找矿方向[J]. *矿业快报*, 4: 79~81.
- 郭 锐, 卜 安. 2006. 粤东火山岩盆地铜-铅-锌多金属矿床找矿新发现与认识[J]. *矿产与地质*, 20(3): 243~246.

- 胡春杰, 黄文婷, 包志伟, 等. 2012. 福建紫金山矿田晚中生代英安玢岩形成时代及其成矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 36(2): 284~292.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481~492.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2 595~2 604.
- 李 斌, 赵葵东, 杨水源, 等. 2013. 福建紫金山矿田二亩沟铜(金)矿区英安玢岩的成因及其成矿意义[J]. 岩石学报, 29(12): 4 167~4 185.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 2005. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 11(3): 291~304.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 等. 2013. 初论华南加里东花岗岩与大规模成矿作用的关系[J]. 高校地质学报, 19(1): 1~11.
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 等. 2006. 华南与花岗岩有关的一种新类型的锡成矿作用: 矿物化学、元素和同位素地球化学证据[J]. 岩石学报, (10): 2 509~2 516.
- 李坤英, 沈加林, 王小平, 等. 1990. 东南沿海火山、侵入杂岩同位素年代学[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 11(4): 45~57.
- 李良林, 周汉文, 陈植华, 等. 2011. 福建太姥山地区花岗岩岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(4): 593~609.
- 李良林, 周汉文, 陈植华, 等. 2013. 福建沿海晚中生代花岗岩岩石成因及其地质意义[J]. 地质通报, 32(7): 1 047~1 062.
- 李献华, 李武显, 何 斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解——观察、解释与检验[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(6): 543~559.
- 毛建仁, 陈 荣, 李寄 , 等. 2006. 闽西南地区晚中生代花岗质岩石的同位素年代学、地球化学及其构造演化[J]. 岩石学报, 22(6): 1 723~1 734.
- 毛建仁, 许乃政, 胡 庆, 等. 2004. 福建省上杭-大田地区中生代成岩成矿作用与构造环境演化[J]. 岩石学报, 20(2): 285~296.
- 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 等. 2009. 华南地区中生代主要金属矿床模型[J]. 地质论评, 55(3): 347~354.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2 329~2 338.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1 035~1 053.
- 陶奎元, 谢家莹, 阮宏宏, 等. 1988. 中国东南沿海中生代火山作用基本特征[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 9(4): 12~28.
- 王对兴, 李春麟, 高万里, 等. 2013. 浙东早白垩世岩浆混合作用: 新昌小将岩体 U-Pb 年代学及地球化学证据[J]. 岩石学报, 29(11): 2 993~4 003.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 肖爱芳, 黎郭朋, 柳小明. 2012. 福建省紫金山铜金矿田石冒山群下组火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年与白垩纪岩浆活动其次. 大地构造与成矿学[J]. 岩石学报, 26(4): 613~623.
- 邢光福. 2000. 台湾: 从粤东沿海逆时针旋转而来的陆块[J]. 火山地质与矿产, 21(3): 157~165.
- 邢光福, 陈 荣, 杨祖良, 周宇章, 李龙明, 姜 杨, 陈志洪. 2009. 东南沿海晚白垩世火山岩浆活动特征及其构造背景[J]. 岩石学报, 25(1): 77~91.
- 徐晓春. 1993. 粤东中生代火山-侵入杂岩的稀土元素地球化学研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 16(2): 121~127.
- 徐晓春, 谢巧勤, 岳书仓. 2000. 粤东地区中生代金属矿床的成矿机制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 23(1): 99~103.
- 徐晓春, 岳书仓, 谢巧勤, 等. 2002. 粤东惠来铜(多金属)矿床地质特征及控矿因素[J]. 矿床地质, 增刊(21): 503~506.
- 尹家衡, 黄光昭, 徐明华. 1989. 粤东中生代火山旋回划分及对比[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 10(4): 16~28.
- 岳书仓, 雷新勇, 龚昌瑞, 等. 1989. 粤东花岗岩及锡、钨矿床的地球化学研究[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 10(1): 27~41.
- 岳书仓, 徐晓春. 1996. 粤东地区中生代岩浆作用的大地构造背景及构造-岩浆演化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 19(1): 127~134.
- 张承帅, 苏慧敏, 于 淼, 等. 2012. 福建龙岩大洋-莒州花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(1): 225~242.
- 赵希林, 毛建仁, 陈 荣, 等. 2008. 闽西南地区紫金山岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 135(4): 590~597.