

文章编号: 0258-7106(2013)03-0467-22

湘东锡田 A 型花岗岩的年代学、Hf 同位素、 地球化学特征及其地质意义*

姚远^{1,2}, 陈骏¹, 陆建军¹, 章荣清¹

(1 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093;
2 南京地质矿产研究所, 江苏 南京 210016)

摘要 对湘东锡田岩体进行的 LA-ICP-MS 定年结果表明, 2 个第一期中(细)粒斑状黑云母二长花岗岩样品的年龄分别为(220.9±0.6)Ma 及(220.7±0.7)Ma; 第二期中细粒二云母二长花岗岩的年龄为(154.4±0.7)Ma。两期花岗岩均为高钾、富碱、弱过铝质岩石。稀土元素总量较高, 富集 U、Th, 亏损 Ti、P 等高场强元素和 Ba、Sr 等大离子亲石元素, 具高的 $10^4 Ga/Al$, 显示 A 型花岗岩特征。印支期花岗岩略富集轻稀土元素, Eu 异常较弱, 燕山期花岗岩轻、重稀土元素分异不明显, Eu 异常显著。Hf 同位素研究显示, 两期次花岗岩均具有较低的 $\epsilon_{Hf}(t)$ (-4.91~-11.04), 亏损地幔二阶段模式年龄集中在 1.6~1.8 Ga, 与华夏地块古老的变质基底年龄一致。因此, 锡田岩体是华夏地块古元古代地壳物质在伸展的构造背景下部分熔融的产物。锡田 A 型花岗岩复式岩体的确定, 对于研究湖南东部在中生代印支、燕山两期构造事件中所处的构造背景具有重要意义, 同时也为华南地区存在印支期 A 型花岗岩钨锡成矿作用增加了证据。

关键词 地球化学; A 型花岗岩; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 地球化学特征; 锡田
中图分类号: P597 **文献标志码**: A

Geochronology, Hf isotopic compositions and geochemical characteristics of Xitian A-type granite and its geological significance

YAO Yuan^{1,2}, CHEN Jun¹, LU JianJun¹ and ZHANG RongQing¹

(1 State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 2 Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract

Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb analysis was carried out for the Xitian granite in east Hunan Province. Two samples from the first period of medium-(fine) grained porphyritic biotite monzonitic granite show ages of (220.9±0.6) Ma and (220.7±0.7) Ma, respectively. The age of the second period of medium-fine grained two-mica monzonitic granite is (154.4±0.7) Ma. Granites of both periods are high potassium, rich in alkali and weakly peraluminous. Their compositions are characterized by high ΣREE , rich U and Th, depleted HFSE such as Ti, P and LILE such as Ba, Sr, and high $10^4 Ga/Al$. These characteristics indicate that they are A-type granites. The Indosinian granite is rich in LREE, with rather weak Eu negative anomaly. The Yanshanian granite shows no obvious fractionation between LREE and HREE, with significant Eu negative anomaly. Hf

* 本文为国家重点基础研究发展计划项目(编号:2012CB416702)和中国地质调查局项目(编号:1212011085407)资助成果
第一作者简介 姚远,男,1985年生,博士研究生,矿床地球化学专业。Email:clark.yao@gmail.com
收稿日期 2012-05-07;改回日期 2013-03-14。张绮玲编辑。

isotopic analysis indicates that the two periods of granite have low $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($-4.91 \sim -11.04$), and the two stage Hf model ages of the depleted mantle are concentrated in 1.6~1.8 Ga, in accordance with characteristics of the old metamorphic basement of Cathaysian block. Therefore, the Xitian granite is a product from partial melting of Proterozoic crust materials of Cathaysian block under the extensional setting. The confirmation of Xitian A-type granite has important significance for understanding the tectonic background of the east part of Hunan Province during Indosinian and Yanshanian movements. It also provides more evidence that there is W-Sn mineralization related to A-type granite during Indosinian period in South China.

Key words: geochemistry, A-type granite, zircon U-Pb geochronology, Hf isotope, geochemical characteristics, Xitian

关于华南中生代成矿花岗岩,过去很长一段时间内认为其绝大部分为燕山期侵位,印支期花岗岩成矿作用较弱(毛景文等,2004;华仁民等,2005a;2005b)。然而,随着近年来测年资料的极大丰富,华南地区存在印支期的钨锡铋钼成矿作用的证据越来越明显(蔡明海等,2006;刘善宝等,2008;邹先武等,2009;杨锋等,2009;冯佳睿等,2011)。另一方面,过去通常认为世界上大多数的锡矿化都是与富F、B、Li和Cs的花岗岩有关(Taylor,1979;Lehmann,1990;Heinrich,1990),这类花岗岩通常是高度分异的S型或者钦铁矿系列的花岗岩。但是,近年来不断发表的文献,将一大批燕山期花岗岩划入A型花岗岩的范畴,甚至厘定出一条北东向的燕山早期含钨锡A型花岗岩带(朱金初等,2008;蒋少涌等,2008)。即便如此,关于华南印支期A型花岗岩的文献仍较少(李万友等,2012),印支期A型成矿花岗岩更是未见报道。因此,华南地区印支期A型成矿花岗岩的发现,为该区中生代大规模成矿作用提供了新的认识。

锡田超大型钨锡多金属矿床($\text{Sn} + \text{W}$ 储量 $\geq 30 \times 10^4$ t,伍式崇等,2011)的发现是国土资源大调查以来南岭地区钨锡找矿工作的重大进展之一。该矿床位于钦-杭成矿带中部,该带是扬子与华夏两大古陆块碰撞拼贴形成的巨型板块结合带(杨明桂等,2009;毛景文等,2011),是中国一条重要的北东向成矿带。该带内及其两侧分布有一大批大型-特大型的W、Sn、Cu、Au、Pb、Zn、Ag等多金属矿床,如柿竹园、黄沙坪、芙蓉、新田岭、香花岭、九嶷山、姑婆山等等。

前人对于锡田矿床的研究主要集中在矿区地质特征、成矿类型及规律、找矿潜力预测等方面(曾桂华等,2005;罗洪文等,2005;蔡新华等,2006;徐辉煌等,2006;伍式崇等,2009;龙宝林等,2009)。然而,对与锡田矿床有关的岩体本身的岩石学和地球化学研

究较为缺乏,而岩石地球化学数据的不系统性又造成了对岩体成因类型(是否A型?)以及构造背景(挤压或拉张?)认识的模糊。例如,马铁球等(2004)在使用前人定年资料(176 Ma)的基础上,认为锡田岩体为燕山早期产物,并根据地球化学特征认为其属于“A型花岗岩类”,形成于后造山的大陆裂解动力学构造背景之下;然而,该作者其后通过锆石SHRIMP研究确定锡田主体花岗岩形成时代为中晚三叠世(228 Ma)(马铁球等,2005),转而认为岩体形成于印支挤压作用造成的局部熔融;此后的文献中均未提及锡田岩体为A型花岗岩。这些情况在很大程度上制约了对该矿床花岗岩-成矿关系的研究。

本文拟对锡田A型印支-燕山期复式岩体的年代学、Hf同位素以及地球化学特征进行系统描述,并讨论其地质意义。

1 地质背景

锡田矿床位于湖南省东南部与江西省交界处,茶陵-永兴断陷盆地东缘,属南岭多金属成矿带北缘,钦杭成矿带中部东缘(图1)。区内主要出露地层为上古生界上泥盆统锡矿山组、余田桥组、中泥盆统棋梓桥组、跳马涧组及下石炭统岩关阶。岩性为浅海相碳酸盐岩、碎屑岩、黏土岩,在石炭系中夹有滨海沼泽相含煤岩系。其中,泥盆系中统棋梓桥组、泥盆系上统锡矿山组下段不纯碳酸盐岩分布广泛,为区内砂卡岩型钨锡矿床的主要赋矿层位。

研究区域主要为锡田岩体中部的哑铃柄状部分(图2A)。区内为一复式向斜,中部被锡田岩体切割为岩体西侧的严塘复式向斜与岩体东侧的小田复式向斜。矿区范围内仅出露复式向斜的次一级褶皱,西侧为垄上向斜,东侧为晒禾岭向斜、荷树下向斜等(图2B)。断裂构造以NE-NNE向压扭性断裂为主,

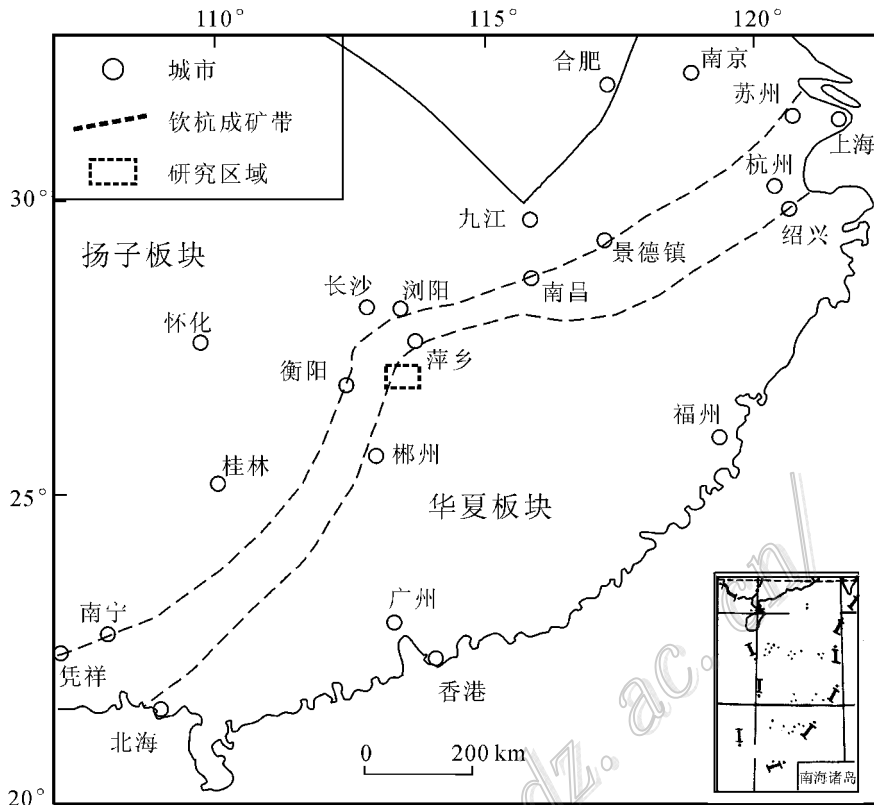


图 1 研究区区域构造示意图

Fig. 1 Regional tectonic sketch map of the study area

次为 SN 向、NW 向张扭性断裂。矿化受断裂控制明显,不同方向断裂交汇处是成矿的有利部位(付建明等,2009)。此外,岩体内部发育的多组裂隙构造控制了区内云英岩脉的产出。

锡田岩体呈近南北向展布的哑铃状,出露面积约 230 km²,是一个多期次侵入形成的复式岩体。岩体侵入于古生界之中,其中的最新地层为二叠系,岩体北西侧被早白垩世红层所覆盖。根据野外观察,可将锡田岩体分为 3 个期次:第一期花岗岩构成岩体的主体,岩性为中(细)粒斑状黑云母二长花岗岩,似斑状结构。斑晶为钾长石,含量约 10%~15%,基质中主要矿物为钾长石(30%~40%)、斜长石(25%~30%)、石英(30%~35%)以及黑云母(3%~8%)等,副矿物有磷灰石、榍石、磁铁矿、锆石等。此外,第一期花岗岩中常见闪长质暗色包体,其中发育大量针状磷灰石;第二期花岗岩出露规模较小,呈零星分布,其岩性为中细粒二云母二长花岗岩,斑状结构,斑晶为钾长石(25%~35%),其他主要矿物为斜长石(25%~30%)、石英(35%~40%)以及黑云母(3%~5%)、白云母(1%~2%)等,副矿物与第一期

花岗岩类似;第三期花岗岩的规模很小,多呈岩瘤、岩枝状产出,岩性为细粒二云母花岗岩,具细粒花岗岩结构。此外,区内岩脉发育,常见的有花岗斑岩脉、石英斑岩脉、辉绿岩脉等。

区内成矿作用显著,已发现规模较大的锡多金属矿脉 30 多条,主要分布在锡田花岗岩体哑铃柄地段东西两侧内外接触带的堍上矿区、晒禾岭矿区、桐木山矿区及荷树下矿区等地。矿化类型主要为矽卡岩型,其次为破碎带蚀变岩型和云英岩型。矿石类型主要为金属硫化物锡矿石,矿石矿物主要为锡石、白钨矿、黄铁矿、黄铜矿,其次为闪锌矿、磁铁矿、磁黄铁矿、毒砂等(伍式崇等,2009)。

2 采样与分析方法

2.1 样品采集

本次所采集的样品主要来自锡田矿床的堍上矿区与桐木山矿区,包括地表样和钻孔样,具体采样位置如图 2B 所示。其中,样品 10XT-02 采自桐木山矿区的钻孔 ZK11601,深度为 155m,岩性为中粒斑状

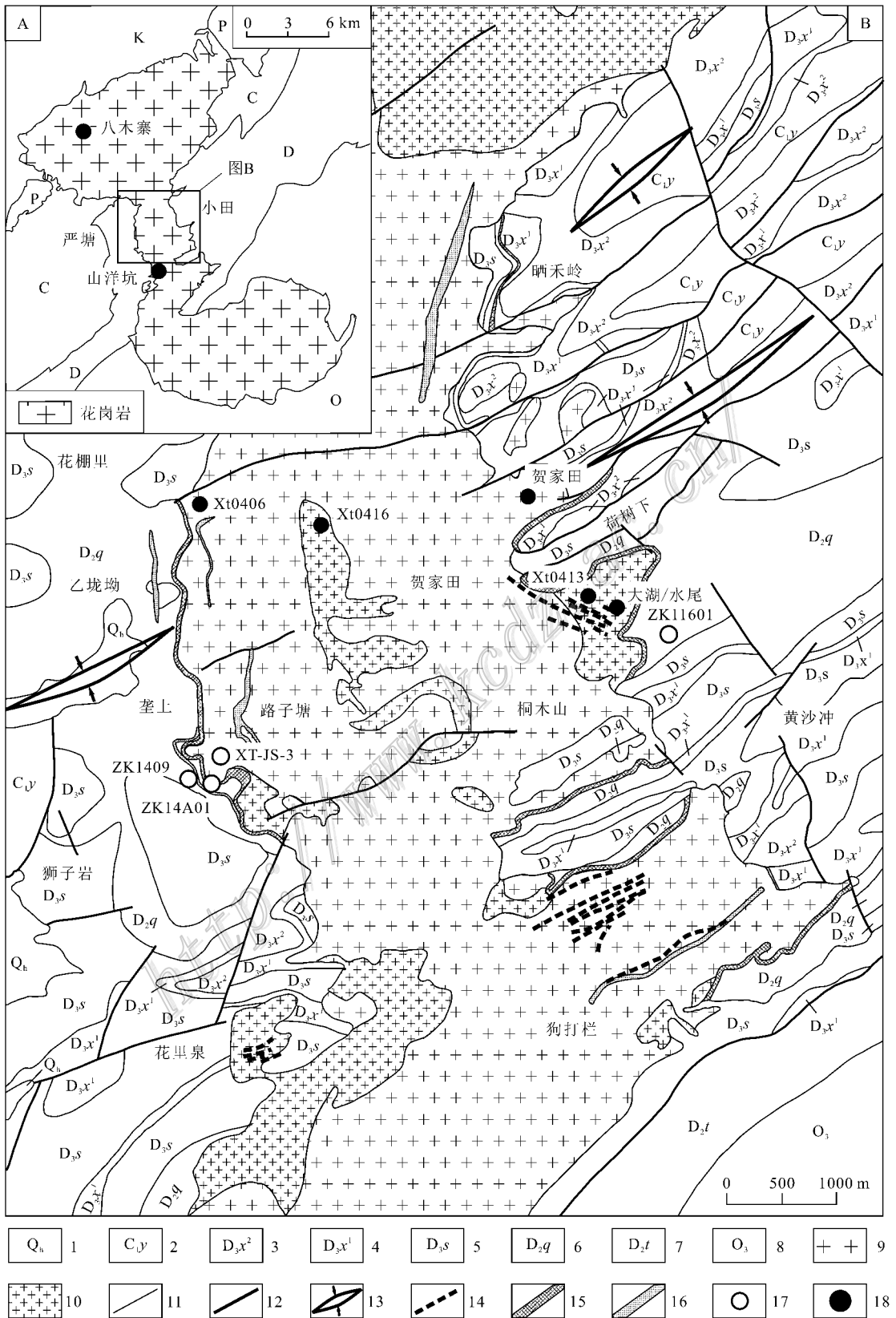


图2 锡田矿床区域地质图(据龙宝林等, 2009 修改)

A. 锡田岩体区域地质图; B. 锡田岩体中部垄上、桐木山矿区地质图

1—第四纪沉积物; 2—石炭系下统岩关阶灰岩; 3—泥盆系上统锡矿山组上段灰岩; 4—泥盆系上统锡矿山组下段灰岩; 5—泥盆系上统余田桥组灰岩; 6—泥盆系中统棋梓桥组灰岩; 7—泥盆系中统跳马洞组砂岩; 8—奥陶系上统灰岩; 9—印支期中细粒花岗岩; 10—燕山期细粒花岗岩; 11—地质界线; 12—断层; 13—向斜; 14—云英岩脉; 15—矽卡岩型钨锡矿脉; 16—破碎带蚀变岩型钨锡矿脉; 17—采样点及钻孔编号; 18—前人采样位置

Fig. 2 Regional geological map of the Xitian deposit (modified after Long et al., 2009)

A. Geological map of Xitian granite; B. Geological map of Longshang and Tongmushan ore section in the central part of Xitian granite
1—Quaternary alluvium; 2—Lower Carboniferous Yanguan Stage; 3—Upper member of Upper Devonian Xikuangshan Formation; 4—Lower member of Upper Devonian Xikuangshan Formation; 5—Upper Devonian Shetianqiao Formation; 6—Middle Devonian Qiziqiao Formation; 7—Middle Devonian Tiaomajian Formation; 8—Upper Ordovician; 9—Indosinian middle-fine-grained granite; 10—Yanshanian fine-grained granite; 11—Geological boundary; 12—Fault; 13—Syncline; 14—Greisen vein; 15—Skarn type W-Sn vein; 16—Fracture zone altered rock type W-Sn vein; 17—Sampling site, drill hole and its serial number; 18—Sampling sites of previous researchers

黑云母二长花岗岩, 样品新鲜无蚀变, 岩体上部为厚层状含钨锡砂卡岩; 样品 XT-88 采自垄上矿区的钻孔 ZK14A01, 深度为 77 m, 岩性为中细粒黑云母二长花岗岩, 样品有极弱的绿泥石化; 样品 XT-60 采自垄上矿区的钻孔 ZK1409, 深度为 242 m, 岩性为中细粒二云母二长花岗岩, 采样位置为花岗岩顶部与云英岩接触部位, 可见弱云英岩化作用; 样品 XT-JS-3, 采自垄上矿区路子塘地表, 岩性为中细粒黑云母二长花岗岩, 样品新鲜无蚀变。为便于对比研究, 后文所用到的已发表过的成岩年龄样品的分布位置也一并标在图 2A、B 中。

2.2 锆石 U-Pb 年代学

样品破碎和锆石分选由河北省地勘局廊坊实验室完成。将分选出的锆石颗粒粘在双面胶上, 并沿直线排列整齐, 用混合有固化剂的环氧树脂胶结。待环氧树脂固化后, 抛光至锆石颗粒中心露出, 制成样品靶。对制成样品靶后的锆石样品, 首先在显微镜下进行透射光和反射光的观察和照相, 分析锆石晶形、包裹体、裂缝等外观特征, 然后进行阴极发光(CL)图像或背散射(BSE)图像分析, 进一步研究锆石的内部结构特征。CL 及 BSE 图像分析在南京大学内生金属成矿作用国家重点实验室 JEOL JXA-8100 电子探针仪上进行。工作条件为: 加速电压 15 kV, 束电流 2×10^{-8} A, 束斑直径 $1 \mu\text{m}$ 。

锆石 U-Pb 年龄 LA-ICP-MS 测定由南京大学成矿作用国家重点实验室完成。ICP-MS 型号为 Agilent 7500a 型, 激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统, 采用 He 气作为剥蚀物质的载气。仪器工作参数为: 激光脉冲重复频率 5 Hz, 脉冲能量为 $10 \sim 20 \text{ J}/\text{cm}^2$, 熔蚀孔径为 $25 \mu\text{m}$, 背景测量时间 40 s, 剥蚀时间 60 s, 积分时间 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb 、 ^{232}Th 、 ^{238}U 依次为 15 ms、30 ms、10 ms、10 ms、15 ms。质量分馏校正采用标样 GEMOC/GJ-1 (609 Ma) (Jackson et al., 2004)。每轮(RUN)测试开

始和结束前, 分别分析 GJ-1 标样 2 次, 中间分析未知样品 12 次, 其中包括 2 次已知年龄样品 Mud Tank [TIMS 年龄: $(732 \pm 5) \text{ Ma}$] (Black et al., 1978)。测试方法和分析流程可详见 He 等(2009)。ICP-MS 的分析数据通过分析软件 GLITTER (ver. 4.4) (Griffin et al., 2008) 计算获得同位素比值、年龄、误差及 Th、U 含量。普通铅校正采用 Andersen (2002) 的方法进行, 校正后的结果用 Isoplot 程序 (ver. 3.2) (Ludwig, 1991) 完成年龄计算和谐和图的绘制。

2.3 全岩化学

对锡田岩体样品分别进行了主量、微量元素测试分析。样品粉碎由河北省地勘局廊坊实验室完成。样品的主量元素测试由南京大学内生金属矿床成矿研究国家重点实验室的 Thermo9900xp 型 X 射线荧光光谱仪完成。首先将样品研磨至 200 目以下并烘干, 再以 1:11 的比例分别称量 1 g 样品及 11 g 四硼酸锂、偏硼酸锂混合助溶剂 ($66.67\% \text{ Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 - 32.83\% \text{ LiBO}_2 - 0.5\% \text{ LiBr}$), 充分混合后倒入干净的铂金坩锅中。将坩锅及模具放入熔炉中, 在 1050°C 经熔融、摇匀、倾倒、冷却等过程后制备成均匀的玻璃片, 上机测试。分析测试方法主要采用曲线法, 目前针对硅酸盐类样品建立的曲线由 GSR-1、GSR-2、GSR-3 等 14 个标准样品组成, 烧失量通过手动输入并参与分析计算, 测试电压电流通常为 50 kV、50 mA, 每个元素扫描时间 40 s。根据标样 (GSR-1 和 GSR-3) 的测定值, 相对误差在元素丰度 $>1.0\%$ 时为 $\pm 1\%$, 元素丰度 $<1.0\%$ 时为 $\pm 10\%$ 。详细流程类似 Franzini 等(1972)文献。样品的微量元素成分在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室分析测试。所用仪器为美国 PerkinElmer 公司 E-LAN DRC-e 型等离子体质谱仪, 详细测试方法和流程见 Qi 等(2000)。对绝大多数微量元素的重复性测试相对标准偏差(RSD)优于 5%。

2.4 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素分析是在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的 Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 上进行的, 激光剥蚀系统为 GeoLas Plus 型紫外激光剥蚀系统。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 采用静态信号采集模式, 背景采集时间 30 s, 积分时间为 0.131 s, 采集 200 组数据, 总计约 30 s。激光能量密度为 15 J/cm^2 , 束斑直径约为 $44 \mu\text{m}$, 剥蚀速率 8 Hz 。为了校正 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的干扰, 取 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.026 58$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 0.796 218$ 作为定值, 分别采用 $^{172}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 1.352 74$, $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 对 Yb, Hf 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正, Lu 的质量歧视和 Yb 一致 (Chu et al., 2002)。相关仪器运行条件及详细分析步骤参见徐平等 (2004) 或 Wu 等 (2006) 文献。测定时使用锆石国际标样 GJ-1 作为参考标准, 分析点在原 U-Pb 定年分析点位置或其附近。每轮 (RUN) 测试开始和结束前, 分别分析 GJ-1 标样 2 次, 中间分析未知样品 12 次, 其中包括 2 次已知年龄样品 Mud Tank。分析过程中锆石标准 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282 010 \pm 24 (2\sigma, n = 30)$, Mud Tank 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282 501 \pm 17 (2\sigma, n = 30)$, 分别与文献报道值 $0.282 013 \pm 4$ 及 $0.282 506 \pm 4$ (Yuan et al., 2008) 在误差范围内完全一致。本文所用的 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.865 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Scherer et al., 2001)。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算中, 采用 Blichert-Toft 等 (1997) 推荐的球粒陨石值 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282 772$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$), 亏损地幔模式年龄 (T_{DM}) 计算采用 Griffin 等 (2002) 推荐的亏损地幔值 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.283 25$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.038 4$)。二阶段模式年龄 (T_{DM}^{C}) 采用平均大陆地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ (Griffin et al., 2002) 进行计算。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

本次用以锆石 U-Pb 定年的 3 个样品为 XT-60、XT-88 和 10XT-02, 均来自钻孔, 分析数据见表 1。所测锆石 Th、U 含量很高, Th/U 比值在 $0.08 \sim 6.22$ 之间, 中值为 0.72, 多数在阴极发光图像 (图 3) 中显示出良好的韵律振荡环带, 属于典型岩浆锆石

(Hoskin et al., 2000)。

3.1.1 第一期花岗岩

样品 10XT-02 中的锆石大多数为无色, 粒径约 $100 \sim 200 \mu\text{m}$, 颗粒晶形多为自形短柱状。锆石中包体常见, 偶见裂纹 (图 3)。分析所得的 22 个点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $220 \sim 221 \text{ Ma}$ 之间, 加权平均值为 $(220.9 \pm 0.6) \text{ Ma}$ (图 3)。

样品 XT-88 中的锆石大多数为无色, 粒径约 $50 \sim 200 \mu\text{m}$ 。颗粒晶形为自形-半自形, 呈长柱状或短柱状, 部分锆石边部被溶蚀呈港湾状 (图 3)。测点 XT-88-24 所在锆石的形态和结构与其他锆石均有一定差异, 为粒状, 磨圆显著, 发育细密的岩浆成因韵律环带并有增生边 (图 3)。它的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(1030 \pm 13) \text{ Ma}$, 另一测点 XT-88-05 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(879 \pm 10) \text{ Ma}$, 有可能是岩浆上升过程中捕获的锆石。其余 15 个锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 $220 \sim 221 \text{ Ma}$ 之间, 加权平均值为 $(220.7 \pm 0.7) \text{ Ma}$ (图 3)。

3.1.2 第二期花岗岩

样品 XT-60 中的锆石大多数为无色, 少部分显浅黄色乃至褐色, 颗粒较小, 粒径约 $50 \sim 200 \mu\text{m}$ 。颗粒晶形为自形-半自形, 多呈短柱状、粒状。部分颗粒 BSE 图像很亮, CL 图像较暗, 无明显环带 (图 3)。分析所得的 11 个点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $154 \sim 155 \text{ Ma}$ 之间, 加权平均值为 $(154.4 \pm 0.7) \text{ Ma}$ (图 3)。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

锡田岩体各期次花岗岩的主量元素数据见表 2。根据 CIPW 标准矿物计算, 两种花岗岩在火成岩 QAP 分类图解中均落入二长花岗岩范围 (图 4), 与镜下观察结果吻合。印支期 (第一期) 花岗岩 [$w(\text{SiO}_2) = 69.36 \sim 73.99$] 较燕山期 (第二期和第三期, 下同) 花岗岩 [$w(\text{SiO}_2) = 73.07 \sim 75.82$] 略为基性。除了 XT-60 由于采自钻孔中花岗岩顶部位置, 存在弱云英岩化, 致使 K、Na 含量偏低外, 岩体具富钾 ($4.39 \sim 5.65$)、高碱 ($7.71 \sim 8.64$) 的特征。除第三期花岗岩为强过铝质 ($A/\text{CNK} = 1.23$) 外, 前两期花岗岩均为弱过铝质 ($A/\text{CNK} = 1.00 \sim 1.10$) (图 5)。在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图上, 印支期花岗岩落入钾玄岩系列与高钾钙碱性系列, 而燕山期花岗岩全部落入高钾钙碱性系列范围内 (图 6)。TiO₂、Al₂O₃、MgO 及 P₂O₅ 含量与 SiO₂ 含量具有明显的负相关关系, 而其他主要元素含量变化相关性不明显。

表 1 锡田岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

样号	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	年龄/Ma	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	年龄/Ma	σ	谐和度/%
10XT-02-01	516.92	1016.00	0.51	0.05420	0.00080	0.26004	0.00412	0.03480	0.00043	0.00043	235	3	0.03480	221	3	94
10XT-02-02	3880.70	2432.78	1.60	0.05452	0.00093	0.26169	0.00492	0.03482	0.00050	0.00050	236	4	0.03482	221	3	94
10XT-02-03	904.36	1469.02	0.62	0.05301	0.00076	0.25447	0.00396	0.03482	0.00044	0.00044	230	3	0.03482	221	3	96
10XT-02-05	1541.76	1113.51	1.38	0.05392	0.00105	0.25889	0.00515	0.03484	0.00046	0.00046	234	4	0.03484	221	3	94
10XT-02-07	3562.14	1680.99	2.12	0.05112	0.00140	0.24539	0.00650	0.03480	0.00048	0.00048	223	5	0.03480	221	3	99
10XT-02-08	998.86	1527.30	0.65	0.05112	0.00094	0.24536	0.00473	0.03481	0.00047	0.00047	223	4	0.03481	221	3	99
10XT-02-11	1520.51	526.72	2.89	0.05525	0.00149	0.26547	0.00702	0.03491	0.00047	0.00047	239	6	0.03491	221	3	92
10XT-02-12	1150.27	2028.78	0.57	0.05218	0.00104	0.25039	0.00506	0.03480	0.00045	0.00045	227	4	0.03480	221	3	97
10XT-02-13	6256.85	3309.66	1.89	0.05508	0.00107	0.26493	0.00563	0.03491	0.00052	0.00052	239	5	0.03491	221	3	92
10XT-02-14	983.01	568.86	1.73	0.05394	0.00096	0.25903	0.00473	0.03483	0.00043	0.00043	234	4	0.03483	221	3	94
10XT-02-15	1500.54	1868.74	0.80	0.05164	0.00073	0.24818	0.00370	0.03486	0.00041	0.00041	225	3	0.03486	221	3	98
10XT-02-16	1384.07	1611.76	0.86	0.05348	0.00084	0.25693	0.00421	0.03485	0.00043	0.00043	232	3	0.03485	221	3	95
10XT-02-18	5255.94	2521.64	2.08	0.05487	0.00092	0.26295	0.00469	0.03476	0.00046	0.00046	237	4	0.03476	220	3	93
10XT-02-19	731.42	3314.84	0.22	0.05199	0.00090	0.24963	0.00431	0.03484	0.00041	0.00041	226	4	0.03484	221	3	98
10XT-02-20	1272.80	2776.71	0.46	0.05434	0.00145	0.26057	0.00706	0.03478	0.00052	0.00052	235	6	0.03478	220	3	94
10XT-02-21	2380.45	546.87	4.35	0.05062	0.00106	0.24302	0.00518	0.03482	0.00045	0.00045	221	4	0.03482	221	3	100
10XT-02-22	396.64	1856.61	0.21	0.05040	0.00122	0.24224	0.00583	0.03486	0.00047	0.00047	220	5	0.03486	221	3	100
10XT-02-23	305.16	772.00	0.40	0.05080	0.00125	0.24414	0.00587	0.03486	0.00045	0.00045	222	5	0.03486	221	3	100
10XT-02-26	918.99	1759.15	0.52	0.05437	0.00130	0.26227	0.00660	0.03499	0.00056	0.00056	236	5	0.03499	222	3	94
10XT-02-27	937.10	2106.20	0.44	0.05316	0.00095	0.25503	0.00472	0.03479	0.00045	0.00045	231	4	0.03479	220	3	95
10XT-02-28	1218.15	1525.79	0.80	0.05293	0.00089	0.25413	0.00444	0.03483	0.00043	0.00043	230	4	0.03483	221	3	96
10XT-02-29	11362.02	1825.51	6.22	0.05572	0.00144	0.26699	0.00699	0.03476	0.00053	0.00053	240	6	0.03476	220	3	92
XT-88-03	103.34	1267.08	0.08	0.05368	0.00083	0.25754	0.00393	0.03480	0.00038	0.00038	233	3	0.03480	221	2	95
XT-88-05	196.43	175.65	1.12	0.07207	0.00117	1.45181	0.02450	0.14607	0.00183	0.00183	911	10	0.14607	879	10	96
XT-88-11	1306.88	754.62	1.73	0.05620	0.00173	0.26909	0.00821	0.03474	0.00053	0.00053	242	7	0.03474	220	3	91
XT-88-14	336.80	3814.68	0.09	0.05218	0.00074	0.25074	0.00403	0.03484	0.00047	0.00047	227	3	0.03484	221	3	97
XT-88-15	3001.78	2037.86	1.47	0.05878	0.00169	0.28271	0.00844	0.03487	0.00063	0.00063	253	7	0.03487	221	4	87
XT-88-16	377.28	337.90	1.12	0.06042	0.00204	0.29020	0.00969	0.03483	0.00054	0.00054	259	8	0.03483	221	3	85
XT-88-19	423.01	2639.92	0.16	0.05471	0.00081	0.26243	0.00390	0.03479	0.00039	0.00039	237	3	0.03479	220	2	93
XT-88-22	427.21	867.91	0.49	0.05589	0.00108	0.26813	0.00528	0.03479	0.00045	0.00045	241	4	0.03479	220	3	91
XT-88-24	183.02	202.05	0.91	0.08137	0.00169	1.94376	0.04057	0.17321	0.00232	0.00232	1096	14	0.17321	1030	13	94

续表 1
 Coun. Table 1

样号	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	谐和度/%
XT-88-25	576.70	906.92	0.64	0.05258	0.00094	0.25263	0.00480	0.03484	0.00047	229	4	221	3	97
XT-88-26	4289.54	2244.22	1.91	0.05990	0.00084	0.28783	0.00420	0.03484	0.00040	257	3	221	2	86
XT-88-30	2967.81	633.33	4.69	0.05321	0.00101	0.25544	0.00484	0.03481	0.00042	231	4	221	3	96
XT-88-33	409.53	482.84	0.85	0.05200	0.00115	0.24935	0.00548	0.03478	0.00043	226	4	220	3	97
XT-88-34	290.28	385.60	0.75	0.06121	0.00241	0.29316	0.01130	0.03472	0.00062	261	9	220	4	84
XT-88-35	3359.58	711.57	4.72	0.05550	0.00101	0.26644	0.00498	0.03482	0.00044	240	4	221	3	92
XT-88-36	394.19	2746.54	0.14	0.05170	0.00098	0.24842	0.00471	0.03487	0.00042	225	4	221	3	98
XT-88-37	294.36	1639.27	0.18	0.05157	0.00088	0.24783	0.00430	0.03487	0.00042	225	3	221	3	98
XT-60-02	260.13	1216.21	0.21	0.05216	0.00120	0.17426	0.00396	0.02423	0.00031	163	3	154	2	94
XT-60-18	126.30	819.67	0.15	0.05060	0.00081	0.16938	0.00278	0.02428	0.00028	159	2	155	2	97
XT-60-22	201.86	409.52	0.49	0.05628	0.00143	0.18769	0.00469	0.02419	0.00031	175	4	154	2	88
XT-60-24	373.13	547.32	0.68	0.05776	0.00243	0.19312	0.00794	0.02425	0.00042	179	7	154	3	86
XT-60-25	163.02	204.09	0.80	0.05639	0.00367	0.18826	0.01194	0.02423	0.00050	175	10	154	3	88
XT-60-27	310.01	542.31	0.57	0.06164	0.00153	0.20614	0.00515	0.02426	0.00034	190	4	155	2	82
XT-60-28	420.46	629.04	0.67	0.05217	0.00104	0.17392	0.00345	0.02418	0.00029	163	3	154	2	94
XT-60-33	233.02	297.25	0.78	0.06092	0.00210	0.20394	0.00677	0.02428	0.00034	188	6	155	2	82
XT-60-34	344.88	386.01	0.89	0.06435	0.00484	0.21437	0.01553	0.02412	0.00065	197	13	154	4	78
XT-60-35	739.04	1807.60	0.41	0.05081	0.00124	0.16989	0.00414	0.02425	0.00034	159	4	154	2	97
XT-60-36	419.38	834.49	0.50	0.04946	0.00104	0.16561	0.00346	0.02428	0.00030	156	3	155	2	99

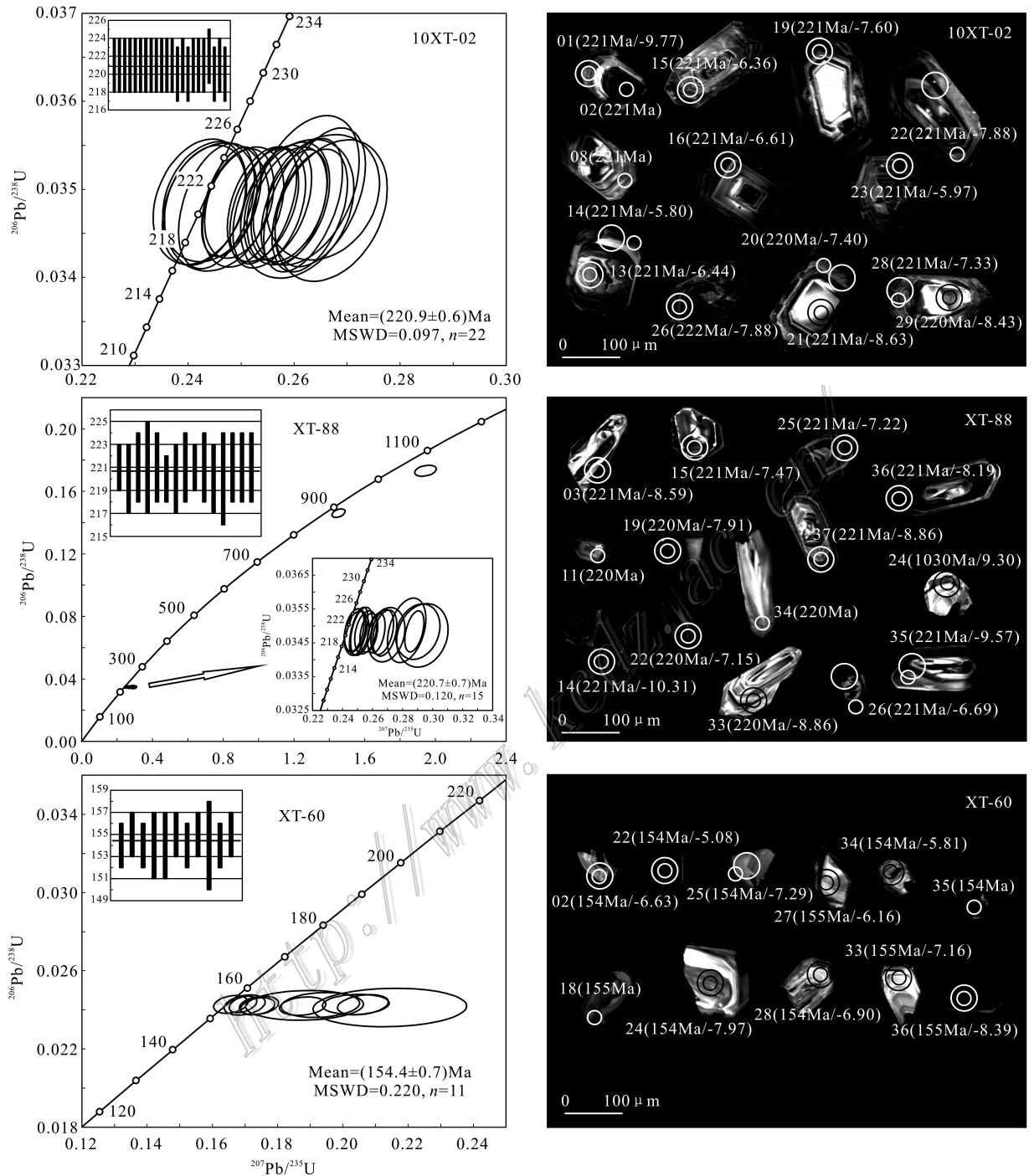


图 3 锡田岩体锆石谱和曲线及代表性锆石 CL 图像

直径较小的圆圈为年龄测点, 直径较大的圆圈为 Hf 同位素测点, 点号旁括号内数字分别为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram and cathodoluminescence images of representative zircons from the Xitian granite

The smaller circles represent the positions of U-Pb measurement and the bigger circles represent the positions of Hf measurement,

numbers in bracket are $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$, respectively

表 2 锡田岩体主量元素和微量元素分析结果
Table 2 Major and trace elements composition of Xitian granite

	第一期(印支期)中(细)粒斑状黑云母二长花岗岩				第二期(燕山期)中细粒二云母二长花岗岩				第三期(燕山期)花岗岩		06XT1-2 铁质包体	
	10XT-02	XT-JS-3	Xt0406	贺家田 2	贺家田 1	XT-60	Xt0416	大湖\水尾	山洋坑	八木寨		Xt0413
SiO ₂	69.48	73.21	69.36	73.99	70.90	74.64	73.07	75.82	75.52	75.51	73.92	65.62
TiO ₂	0.46	0.33	0.39	0.16	0.41	0.12	0.26	0.05	0.07	0.11	0.03	0.56
Al ₂ O ₃	14.35	13.47	13.40	13.01	13.67	12.72	13.44	12.03	12.06	12.68	15.28	16.28
Fe ₂ O ₃	0.21	0.25	-	0.23	0.37	0.11	-	0.20	0.54	0.50	-	0.26
FeO	2.32	1.53	-	2.25	3.12	1.17	-	2.45	2.28	1.52	-	4.15
FeO ^T	2.51	1.76	2.71	2.46	3.45	1.27	2.25	2.63	2.77	1.97	1.07	4.38
Fe ₂ O ₃ ^T	2.79	1.95	3.01	2.73	3.83	1.41	2.50	2.92	3.07	2.19	1.19	4.87
MnO	0.07	0.08	0.07	0.04	0.08	0.05	0.08	0.06	0.08	0.05	0.04	0.12
MgO	0.98	0.69	0.93	0.22	0.75	0.34	0.31	0.12	0.20	0.22	0.00	1.14
CaO	1.83	1.54	1.71	1.08	1.72	1.33	0.87	0.70	0.62	0.46	0.48	2.58
Na ₂ O	2.97	3.10	3.32	2.86	2.90	1.92	3.29	3.18	3.23	3.10	3.97	3.23
K ₂ O	5.44	4.67	4.39	5.65	5.03	4.28	4.79	4.70	4.45	5.12	4.67	5.61
P ₂ O ₅	0.18	0.14	0.13	0.04	0.14	0.03	0.13	0.02	0.01	0.03	0.01	0.24
烧失量	0.58	0.97	1.46	0.35	0.98	2.40	0.58	0.59	0.93	1.05	0.59	0.02
总和	99.13	100.15	98.17	100.13	100.41	99.25	99.32	100.19	100.24	100.52	100.18	100.27
Sc	9.02	6.43	5.73	3.70	6.70	5.83	4.49	4.30	6.20	3.80	3.68	7.92
V	47.07	28.11	34.36	12.50	41.20	5.43	10.26	8.10	8.50	10.20	0.67	55.27
Cr	5.24	3.03	4.00	7.70	5.40	29.09	3.21	22.00	20.00	15.10	4.40	10.8
Co	5.02	3.51	4.35	3.60	6.40	0.91	2.60	3.10	3.60	3.00	1.01	6.3
Be	9.79	35.35	-	5.50	6.70	18.28	-	6.30	18.80	11.10	-	-
Li	221.93	164.37	-	79.00	134.00	716.65	-	387.20	382.10	137.30	-	66.13
Cs	56.34	58.05	39.72	16.40	32.30	52.35	47.01	63.10	58.20	43.30	24.13	-
Rb	424.08	483.06	283.70	375.00	336.80	664.19	518.90	819.20	803.70	381.50	786.30	510.8
Ba	861.12	331.04	316.10	221.00	551.00	139.95	13.84	61.00	74.00	120.00	19.67	1293.45
Th	38.10	48.49	30.94	65.50	45.90	49.42	31.59	39.20	41.00	29.00	14.46	87.11
U	13.19	20.43	17.32	10.60	5.60	25.74	19.56	12.40	20.80	5.40	10.95	12.02
Nb	20.96	20.45	15.76	20.80	20.80	28.16	26.15	33.10	38.90	19.30	27.58	26.75
Ta	2.75	3.11	2.31	1.90	1.80	6.20	6.82	9.60	14.30	2.70	17.69	2.08
Pb	62.67	64.36	39.62	47.40	71.70	42.89	39.24	51.60	61.90	72.70	150.90	149.61
Sr	320.37	177.36	182.80	49.00	173.00	32.34	43.51	10.00	10.00	40.00	16.95	485.03
Zr	243.18	201.38	150.90	127.00	193.00	132.21	141.10	96.00	96.00	76.00	88.77	505.8
Hf	6.57	6.95	4.56	5.10	6.00	5.10	4.64	3.30	3.70	3.60	1.12	13.26
Y	22.55	18.06	23.74	31.62	26.68	95.35	42.41	128.00	77.83	36.21	70.61	30
Ga	18.08	18.10	22.63	21.70	18.90	22.38	22.65	22.50	25.10	19.80	26.22	46.77
W	8.20	2.27	-	2.70	1.18	23.87	-	7.78	43.21	2.32	-	10.754

续表 2

Count, Table 2

	第一期(印支期)中(细)粒斑状黑云母二长花岗岩				第二期(燕山期)中细粒二云母二长花岗岩				第三期(燕山期)花岗岩		铁矿石包体	
	10XT-02	XT-JS-3	Xt0406	贺家田 2	贺家田 1	XT-60	Xt0416	大湖\水尾	山洋坑	八木寨		Xt0413
Sn	19.77	24.76	-	25.30	34.90	45.03	-	33.60	49.70	26.00	-	14.82
La	68.88	56.47	58.89	73.78	74.49	50.33	37.44	30.82	20.63	22.13	19.66	225.12
Ce	145.55	108.23	121.10	141.10	135.10	112.12	81.61	70.92	45.86	42.37	50.96	347.52
Pr	14.94	11.92	13.65	16.20	16.26	13.10	9.79	9.89	6.16	5.84	6.79	47.59
Nd	50.98	40.74	47.65	56.13	55.49	45.70	36.52	37.05	25.64	22.96	26.34	117.18
Sm	7.92	6.00	7.60	9.89	8.80	11.81	7.60	11.92	8.57	5.74	9.78	13.7
Eu	1.40	0.95	0.94	0.62	1.25	0.30	0.44	0.12	0.13	0.34	0.05	2.71
Gd	5.42	4.68	4.97	7.33	6.21	12.02	6.74	13.54	9.34	5.54	11.67	11.3
Tb	0.82	0.59	0.79	1.24	0.93	2.38	1.17	2.96	2.04	0.98	2.67	1.26
Dy	3.87	3.34	4.45	6.76	4.99	14.61	7.51	20.97	13.55	6.13	18.47	5.61
Ho	0.75	0.62	0.90	1.30	1.00	3.04	1.53	4.53	2.82	1.30	3.75	1
Er	2.46	1.95	2.73	3.32	2.86	9.66	4.65	14.46	8.83	3.87	12.99	3.27
Tm	0.35	0.32	0.39	0.48	0.45	1.52	0.78	2.61	1.58	0.66	2.53	0.51
Yb	2.57	2.36	2.85	2.60	2.95	10.03	5.75	18.92	11.48	4.43	19.68	3.32
Lu	0.38	0.40	0.43	0.32	0.47	1.47	0.85	3.17	1.81	0.69	3.02	0.52
ACNK	1.02	1.04	1.00	1.02	1.02	1.24	1.10	1.04	1.07	1.10	1.23	1.01
ANK	1.33	1.32	1.31	1.20	1.34	1.63	1.27	1.16	1.19	1.19	1.32	1.43
K ₂ O + Na ₂ O	8.41	7.77	7.71	8.51	7.93	6.20	8.08	7.88	7.68	8.22	8.64	8.84
(K ₂ O + Na ₂ O)/CaO	4.60	5.05	4.51	7.88	4.61	4.66	9.29	11.26	12.39	17.87	18.00	3.43
FeO*/MgO	2.56	2.54	2.91	11.17	4.60	3.73	7.26	21.92	13.83	8.95	1071.00	3.85
10 ⁴ Ga/Al	2.38	2.54	3.19	3.15	2.61	3.32	3.18	3.53	3.93	2.95	3.24	5.43
Zr + Nb + Y + Ce	432.23	348.11	311.50	320.52	375.58	367.84	291.27	328.02	258.59	173.88	237.92	910.07
T _{Zr} /C°	817	807	775	766	799	792	782	748	750	734	752	878
Sm/Nd	0.16	0.15	0.16	0.18	0.16	0.26	0.21	0.32	0.33	0.25	0.37	0.12
Nb/Ta	7.63	6.57	6.83	10.95	11.56	4.54	3.83	3.45	2.72	7.15	1.56	12.86
Rb/Sr	1.32	2.72	1.55	7.65	1.95	20.54	11.93	81.92	80.37	9.54	46.39	1.05
Eu/Eu*	0.62	0.53	0.44	0.21	0.49	0.08	0.18	0.03	0.18	0.18	0.01	0.65
LREE/HREE	17.43	15.73	14.27	12.75	14.67	4.26	5.99	1.98	2.08	4.21	1.52	28.14
(La/Yb) _N	18.09	16.14	13.95	19.18	17.06	3.39	4.40	1.10	1.21	3.38	0.68	45.82
ΣREE	306.27	238.56	267.33	321.07	311.25	288.09	202.37	241.88	158.44	122.98	188.36	780.61
年龄	220.9 ± 0.6	-	230.4 ± 2.3 ^b	228.5 ± 2.5	-	154.4 ± 0.7	151 ± 24	155.5 ± 1.7	-	-	147 ± 2.8 ^c	-
方法	锆石 LA-ICPMS	-	锆石 SHRIMP	锆石 SHRIMP	-	锆石 LA-ICPMS	全岩 Rb-Sr	锆石 SHRIMP	-	-	锆石 SHRIMP	-
来源	自测	自测	刘国庆等, 2008	马铁球, 2005	马铁球等, 2004	自测	刘国庆等, 2008	马铁球等, 2005	马铁球等, 2004	马铁球等, 2004	刘国庆等, 2008	南岭锡矿, 2011

注: 比值单位为 1。上角 a 为 Zr 饱和温度计算据文献 Watson 等(1983); 上角 b 为刘国庆等(2008)采用全岩 Rb-Sr 法测得年龄为(165 ± 16) Ma, 误差较大; 此外改用与其同一课题组的付建明等(2009)的锆石 SHRIMP 年龄; 上角 c 为刘国庆等(2008)采用全岩 Rb-Sr 法测得年龄为(114 ± 14) Ma, 误差较大; 此外改用与其同一课题组的付建明等(私人通信)的锆石 SHRIMP 年龄。

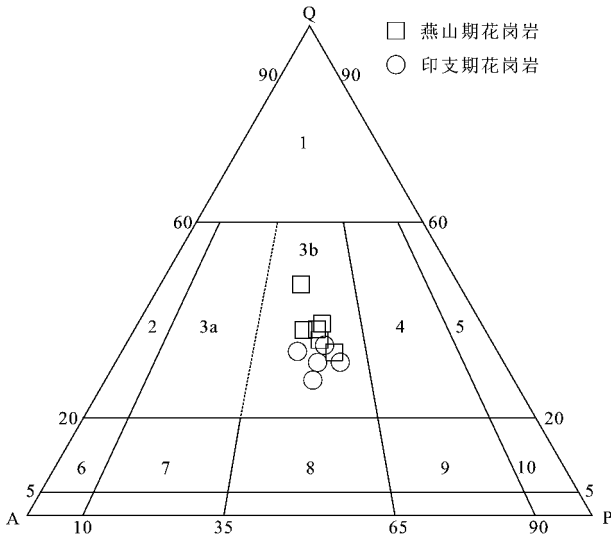


图4 锡田岩体 CIPW 标准矿物的 QAP 分类图(底图据 IUGS, 1973; Le Maitre, 1989)

1—富石英花岗岩; 2—碱性长石花岗岩; 3a—正长花岗岩; 3b—二长花岗岩; 4—花岗闪长岩; 5—英云闪长岩; 6—碱性长石石英正长岩; 7—石英正长岩; 8—石英二长岩; 9—石英二长闪长岩/石英二长辉长岩; 10—石英闪长岩/石英辉长岩

Fig. 4 QAP diagram of CIPW standard mineral of Xitian granite (after IUGS, 1973; Le Maitre, 1989)

1—Quartzolite; 2—Alkali-feldspar granite; 3a—Syeno-granite; 3b—Monzo-granite; 4—Grandiorite; 5—Tonalite; 6—Alkali-feldspar quartz syenite; 7—Quartz syenite; 8—Quartz monzonite; 9—Quartz monzodiorite/quartz monzogabbro; 10—Quartz diorite/quartz gabbro

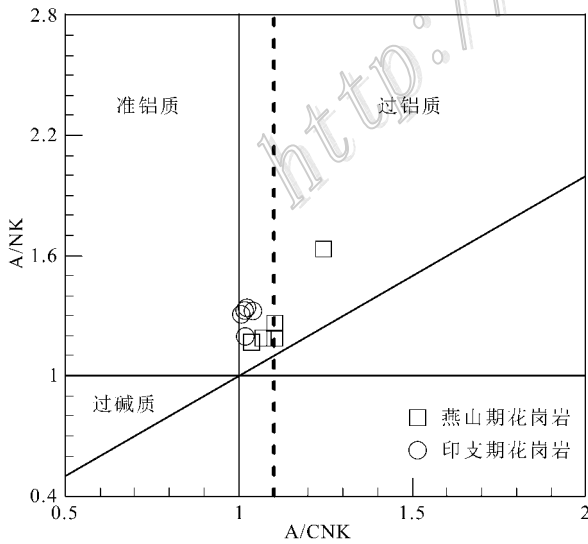


图5 锡田岩体 A/CNK-A/NK 图解 (底图据 Maniar et al., 1989)

Fig. 5 A/CNK-A/NK diagram of Xitian granite (after Maniar et al., 1989)

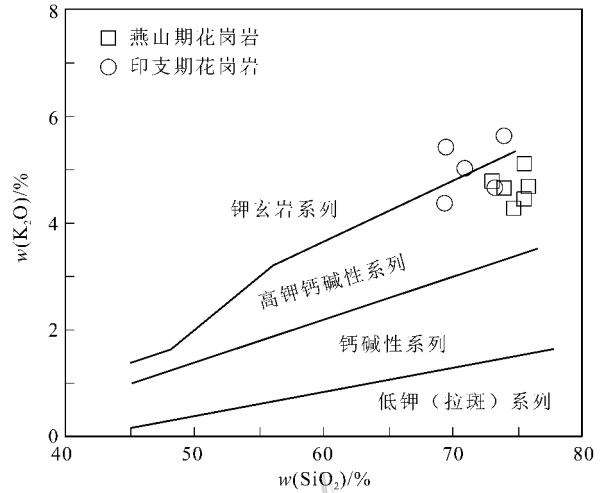


图6 锡田岩体 SiO₂-K₂O 图解 (底图据 Collins et al., 1982)

Fig. 6 SiO₂-K₂O diagram of Xitian granite (after Collins et al., 1982)

3.2.2 微量元素

锡田岩体各期次花岗岩的微量元素数据见表2。印支期花岗岩稀土元素总量较高($\Sigma\text{REE} = 238.56 \sim 321.07$),轻重稀土元素分馏明显,轻稀土元素富集,重稀土元素亏损[(La/Yb)_N = 13.95 ~ 19.18, LREE/HREE = 12.75 ~ 17.43],Eu 负异常不明显($\delta\text{Eu} = 0.21 \sim 0.62$),在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线上呈平缓的“右倾”型(图7)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图7)上,亏损 Ta、Ti、P 等高场强元素和 Ba、Sr 等大离子亲石元素,富集 U、Th。燕山期花岗岩稀土元素总量稍低($\Sigma\text{REE} = 122.98 \sim 288.09$),轻重稀土元素比值较小[(La/Yb)_N = 0.68 ~ 4.40; LREE/HREE = 1.52 ~ 5.99],负钕异常明显($\delta\text{Eu} = 0.03 \sim 0.18$),在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线上呈平坦“海鸥”型(图7)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图7)上,显著亏损 Ti、P 等高场强元素和 Ba、Sr 等大离子亲石元素,而 Ta 元素变为显著富集,表明岩浆存在强烈的分离结晶作用。

3.3 Hf 同位素

对相同颗粒锆石进行了原位 Hf 同位素分析,结果如表3所示。印支期花岗岩的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值在 0.282 337~0.282 489 之间,平均值为 0.282 422,计算所得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -5.35 ~ -11.04 之间,平均值为 -7.31,峰值在 -8.00 ~ -9.00 之间;二阶段模式年龄(T_{DM}^{C})在 1.59 ~ 1.95 Ga 之间,均值为 1.73 Ga,峰值在 1.65 ~ 1.70 Ga 之间(图8)。年龄为

表 3 锡田岩体锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of Xitian granite

样品号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\text{Hf}_{(\text{initial})}$	年龄/Ma	ε_{Hf}	$T_{(\text{DM})}$	$T_{(\text{DM})}^{\text{C}}$
10XT02-01	0.282363	0.000038	0.001003	0.022995	0.282359	221	-9.77	1.26	1.87
10XT02-03	0.282444	0.000033	0.001519	0.041301	0.282438	221	-6.97	1.16	1.69
10XT02-04	0.282446	0.000034	0.000653	0.016237	0.282443	221	-6.79	1.13	1.68
10XT02-05	0.282444	0.000024	0.000829	0.023300	0.282441	221	-6.87	1.14	1.69
10XT02-11	0.282409	0.000039	0.001524	0.042214	0.282403	221	-8.21	1.21	1.77
10XT02-12	0.282413	0.000026	0.001762	0.046916	0.282406	221	-8.09	1.21	1.76
10XT02-13	0.282457	0.000030	0.000922	0.024728	0.282453	221	-6.44	1.12	1.66
10XT02-14	0.282475	0.000020	0.000899	0.023647	0.282471	221	-5.80	1.10	1.62
10XT02-15	0.282460	0.000021	0.001197	0.032254	0.282455	221	-6.36	1.13	1.65
10XT02-16	0.282455	0.000026	0.001622	0.043352	0.282448	221	-6.61	1.15	1.67
10XT02-18	0.282447	0.000023	0.001402	0.038854	0.282441	221	-6.85	1.15	1.68
10XT02-19	0.282426	0.000020	0.001475	0.038444	0.282420	221	-7.60	1.18	1.73
10XT02-20	0.282430	0.000022	0.001180	0.031807	0.282426	221	-7.40	1.17	1.72
10XT02-21	0.282400	0.000024	0.002141	0.061914	0.282391	221	-8.63	1.24	1.80
10XT02-22	0.282415	0.000013	0.000779	0.018250	0.282412	221	-7.88	1.18	1.75
10XT02-23	0.282471	0.000019	0.001155	0.031338	0.282466	221	-5.97	1.11	1.63
10XT02-26	0.282419	0.000017	0.001763	0.046750	0.282412	221	-7.88	1.20	1.75
10XT02-27	0.282489	0.000020	0.001236	0.033434	0.282484	221	-5.35	1.09	1.59
10XT02-28	0.282433	0.000018	0.001289	0.032637	0.282428	221	-7.33	1.17	1.71
10XT02-29	0.282409	0.000025	0.002933	0.087634	0.282397	221	-8.43	1.26	1.78
XT88-03	0.282399	0.000025	0.001753	0.046507	0.282392	221	-8.59	1.23	1.79
XT88-14	0.282351	0.000024	0.001885	0.049997	0.282344	221	-10.31	1.31	1.90
XT88-15	0.282437	0.000025	0.003133	0.092360	0.282424	221	-7.47	1.22	1.72
XT88-16	0.282419	0.000020	0.001807	0.048688	0.282411	221	-7.91	1.21	1.75
XT88-22	0.282439	0.000035	0.001507	0.040041	0.282433	221	-7.15	1.17	1.70
XT88-24	0.282424	0.000021	0.001713	0.046567	0.282391	1030	9.30	1.20	1.29
XT88-25	0.282436	0.000022	0.001170	0.030993	0.282431	221	-7.22	1.16	1.71
XT88-26	0.282457	0.000029	0.002700	0.079498	0.282446	221	-6.69	1.18	1.67
XT88-30	0.282348	0.000030	0.001818	0.051986	0.282340	221	-10.43	1.31	1.91
XT88-33	0.282390	0.000021	0.001338	0.035935	0.282384	221	-8.86	1.23	1.81
XT88-35	0.282374	0.000029	0.002346	0.065354	0.282364	221	-9.57	1.29	1.86
XT88-36	0.282411	0.000020	0.001776	0.048267	0.282403	221	-8.19	1.22	1.77
XT88-37	0.282391	0.000020	0.001591	0.042446	0.282385	221	-8.86	1.24	1.81
XT88-38	0.282406	0.000025	0.001197	0.032859	0.282401	221	-8.29	1.20	1.77
XT88-39	0.282461	0.000022	0.002485	0.072069	0.282451	221	-6.50	1.17	1.66
XT88-40	0.282337	0.000026	0.003430	0.097465	0.282323	221	-11.04	1.38	1.95
XT60-02	0.282495	0.000030	0.002112	0.060348	0.282489	154	-6.63	1.11	1.62
XT60-18	0.282501	0.000018	0.001203	0.033668	0.282498	154	-6.33	1.07	1.60
XT60-22	0.282543	0.000031	0.003616	0.103302	0.282533	154	-5.08	1.08	1.52
XT60-24	0.282454	0.000021	0.000830	0.023782	0.282451	154	-7.97	1.13	1.70
XT60-25	0.282474	0.000024	0.001262	0.036938	0.282470	154	-7.29	1.11	1.66
XT60-26	0.282506	0.000032	0.001071	0.032947	0.282502	154	-6.16	1.06	1.59
XT60-27	0.282485	0.000019	0.001188	0.034087	0.282481	154	-6.90	1.09	1.64
XT60-28	0.282478	0.000023	0.001283	0.037870	0.282474	154	-7.16	1.11	1.65
XT60-34	0.282517	0.000021	0.001700	0.046509	0.282512	154	-5.81	1.06	1.57
XT60-36	0.282443	0.000018	0.001108	0.031579	0.282439	154	-8.39	1.15	1.73
XT60-37	0.282514	0.000018	0.002855	0.081250	0.282506	154	-6.02	1.10	1.58
XT60-38	0.282517	0.000016	0.005776	0.163173	0.282501	154	-6.22	1.19	1.59
XT60-39	0.282557	0.000014	0.006665	0.192480	0.282538	154	-4.91	1.16	1.51
XT60-40	0.282491	0.000011	0.004421	0.127374	0.282478	154	-7.01	1.19	1.64
XT60-41	0.282489	0.000017	0.003780	0.102548	0.282478	154	-7.03	1.17	1.65
XT60-42	0.282483	0.000016	0.004566	0.131216	0.282470	154	-7.31	1.20	1.66
XT60-43	0.282514	0.000014	0.001581	0.045160	0.282510	154	-5.91	1.06	1.57

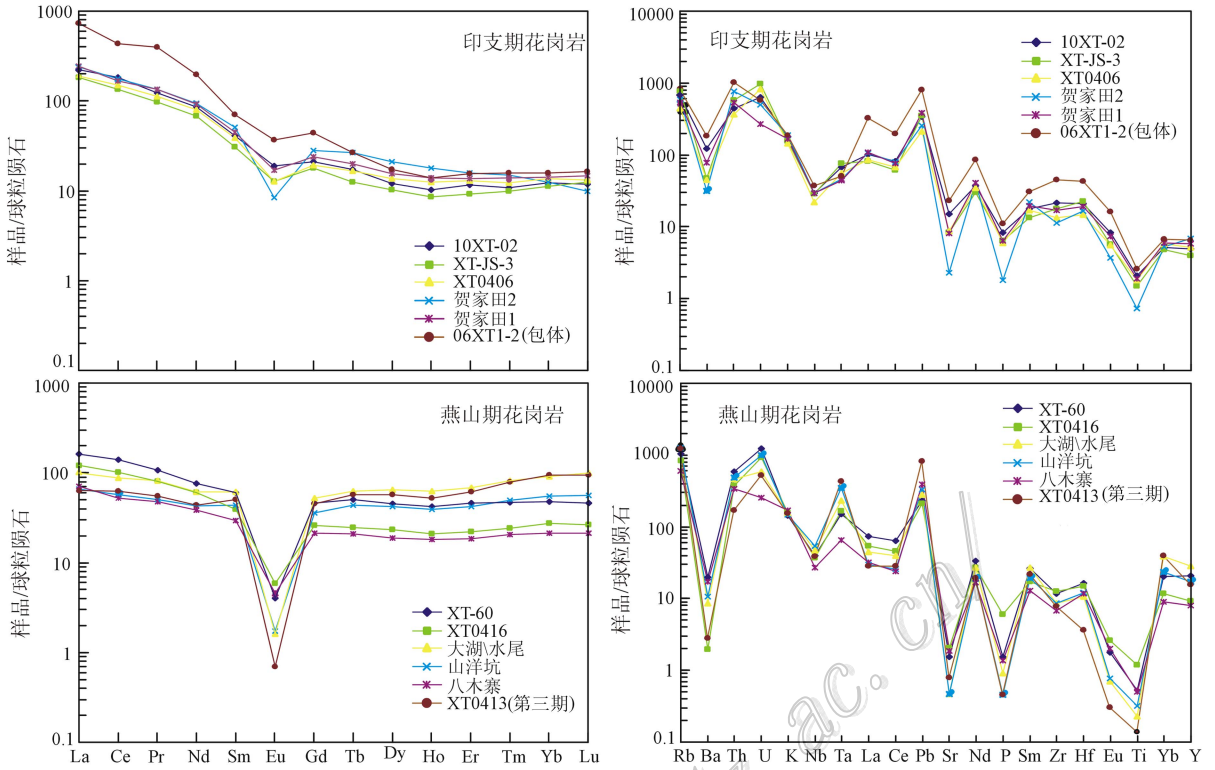


图7 锡田岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线及微量元素原始地幔标准化蛛网图
球粒陨石标准化数据据 Sun et al. (1989); 原始地幔标准化数据据 Boynton (1984)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spider diagram of Xitian granite
Data of chondrite are from Sun et al. (1989), Data of primitive mantle are from Boynton (1984)

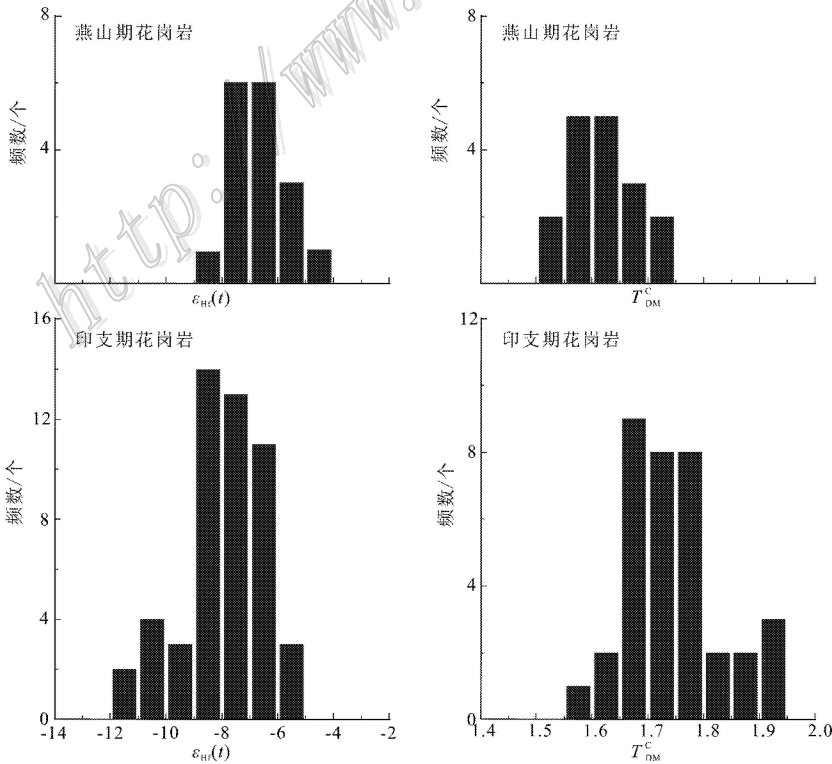


图8 锡田岩体锆石 Hf 同位素组成和模式年龄统计直方图

Fig. 8 Histograms of $\epsilon_{Hf}(t)$ and Hf model ages of zircons for Xitian granite

1030 Ma 的继承锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282 424, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 9.30, 二阶段模式年龄 (T_{DM}^{C}) 为 1.29 Ga。燕山期花岗岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.282 443~0.282 557 之间, 平均值为 0.282 498, 计算所得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -4.91~-7.97 之间, 平均值为 -6.60, 峰值在 -6.00~-8.00 之间, 二阶段模式年龄 (T_{DM}^{C}) 在 1.51~1.73 Ga 之间, 均值为 1.62 Ga, 峰值在 1.55~1.65 Ga 之间(图 8)。

4 讨 论

4.1 成岩年代学意义

原湖南省区调队三分队(1965 年)在 1:20 万攸县区调图幅中, 根据对第一期细中粒斑状花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果(177 Ma), 将锡田岩体第一期划为燕山早期; 马铁球等(2005)根据在贺家田、水尾两单元分别采样所获得的两个锆石 SHRIMP U-Pb 年龄结果(229 Ma, 156 Ma)将锡田岩体第一期划为印支期, 第二期划为燕山早期; 然而, 刘国庆等(2008)根据全岩 Rb-Sr 等时线年龄, 将锡田岩体划分为第一期(165 Ma), 第二期(151 Ma)和第三期花岗岩(114 Ma), 全部属于燕山期。付建明等(2009)对锡田第一期中细粒斑状黑云母二长花岗岩再次进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 其结果再次印证了锡田花岗岩的第一期侵位于印支期而不是燕山早期。本次对锡田岩体的再次定年, 验证了锡田岩体第一

期中细粒斑状黑云母二长花岗岩为印支期侵位, 年龄较前人数据稍晚, 属三叠纪晚期(221 Ma)。第二期燕山期中细粒二云母二长花岗岩侵位与前人数据一致, 为侏罗纪晚期(154 Ma)。此外, 付建明等(私人通信)测得第三期花岗岩年龄亦为侏罗纪晚期(147 Ma), 与第二期花岗岩相差 7 Ma。

过去已发表的锡田成矿年代数据全部集中于燕山期(150 Ma、157 Ma), 故认为成矿仅仅与燕山期花岗岩有关(刘国庆等, 2008; 马丽艳等, 2008)。然而, 近期通过对山田矿段钨锡矿中辉钼矿 Re-Os 同位素测定, 发现成矿年龄多为印支期(付建明, 私人通信), 并且本文所采样的桐木山矿段含钨锡云英岩-石英脉、矽卡岩与印支期花岗岩在空间上关系密切, 如本文在 ZK11601 中所测得的印支期花岗岩上部即为含钨锡矽卡岩。因此, 有理由推测锡田印支期花岗岩也与成矿有关。近年来随着地质填图工作的深入以及高精度定年技术的迅猛发展, 南岭地区一些岩体的成岩、成矿时代逐显明朗, 相继发现了一批印支期的钨锡矿化(表 4)。毛景文等(2009)认为华南地区中生代主要金属矿床出现在 3 个阶段, 即晚三叠世(230~210 Ma)、晚侏罗世(170~150 Ma)和早-中白垩世(134~80 Ma, 集中在 110~80 Ma); 华仁民等(2010)认为印支期也可能成为华南锡的主要成矿期之一。锡田印支期成矿花岗岩的证实, 为研究华南印支期花岗岩成矿作用提供了又一例证。另一方面, 锡田矿床与燕山期花岗岩有关的大规模矿化则正好处

表 4 华南印支期矿床成岩成矿年龄

Table 4 Ages of petrogenesis and mineralization of Indonesian deposits in South China

矿床	成岩年龄/Ma	测试对象及方法	参考文献	成矿年龄/Ma	测试对象及方法	参考文献
湖南荷花坪 Sn 多金属矿	224.9±1.8	锆石 U-Pb LA-ICPMS	Yao et al. (审稿中)	224.0±1.9	辉钼矿 Re-Os	蔡明海等, 2006
湖南锡田 Sn-W 多金属矿	220.9±0.6	锆石 U-Pb LA-ICPMS	本文	212.8±3.0	辉钼矿 Re-Os	付建明, 私人通信
江西仙鹤塘 Sn-W 多金属矿	251.5±6.6	锆石 U-Pb SHRIMP	郭春丽等, 2011	231.4±2.4	白云母 Ar-Ar	刘善宝等, 2008
福建红山 Sn-U 矿	226.2±2.4	锆石 U-Pb SHRIMP	赵蕾等, 2006	-	-	-
广西栗木 W-Sn-Nb-Ta 多金属矿	224.8±1.6	锆石 U-Pb LA-ICPMS	Zhang et al., 2013	214.1±1.9	白云母 Ar-Ar	杨锋等, 2009
广西云头界 W-Mo 矿	216.8±4.9	锆石 U-Pb LA-ICPMS	Wu et al., 2012	216.8±7.5	辉钼矿 Re-Os	Wu et al., 2012
广西李贵福 W-Sn 多金属矿	209	锆石 U-Pb SHRIMP	付建明, 私人通信	211.9±6.4	辉钼矿 Re-Os	邹先武等, 2009
云南南秧田 W 矿	-	-	-	214.1±4.3	辉钼矿 Re-Os	冯佳睿等, 2011
云南新寨 Sn 矿	-	-	-	209.0±2.2	金云母 Ar-Ar	冯佳睿等, 2011

于华南中生代的大规模成矿作用或成矿大爆发的时代(165~150 Ma)(毛景文等, 2004; 2007), 属于钨锡成矿高峰期(160~150 Ma)(华仁民等, 2010)。因此, 锡田岩体是一个印支、燕山两期成岩成矿的复式岩体, 具有巨大的找矿潜力。

4.2 A型花岗岩的判定

在当前研究中, 花岗岩通常被分为 I 型、S 型、M 型和 A 型 4 种。前三种类型主要是根据其源岩性质划分的, 而 A 型花岗岩是由 Loiselle 等 (1979) 于 1979 年在 GSA 年会上提出的, 其含义是指碱性 (alkaline)、无水 (anhydrous)、非造山 (anorogenic) 的花岗岩, 不涉及其成岩物质来源。

虽然 A 型花岗岩具有特殊的地球化学特征, 但是与高分异 I、S 型花岗岩依然很难区分 (King et al., 1997)。锡田岩体富硅, 准铝质, 富含 K_2O 和总碱, 贫钙低镁, 稀土元素总量较高, 强烈亏损 Sr、Ba、P、Ti, 具有 A 型花岗岩的一般特征 (Collins et al., 1982)。它与高分异 I、S 型花岗岩的区别在于: 首先, 锡田岩体具有与 S 型花岗岩相比较低的 $w(P_2O_5)$ (0.01~0.18%) 和较高的 $w(Na_2O)$ (1.92~3.32) (King et al., 1997); 其次, 锡田岩体的全铁 $w(FeO^T)$ (1.07~3.45) 高于高分异 I 型花岗岩 (<1%) (王强等, 2000); 再次, 在 Whalen 等 (1987) 的 A 型花岗岩微量元素判别图中, 全部落在 A 型花岗岩区域 (图

9)。根据 Eby (1990) 的 A 型亚类判别图, 可将 A 型花岗岩进一步划分为 A1 (碱性)、A2 (铝质) 两个亚类。通过对锡田的印支、燕山两期花岗岩分别投图发现 (图 10), 在两种判别图上, 印支期花岗岩落在 A1、A2 的分界线上, 与花山、姑婆山 A 型花岗岩类似 (朱金初等, 2008)。但从整体上看, 印支期花岗岩仍属于 A2 型, 而燕山期花岗岩则全部落在 A2 型内部。因此, 可将锡田岩体判定为铝质 A 型花岗岩。

需要特别指出的是, Whalen 等 (1987) 的判别图具有 $10^4 Ga/Al$ 以及 $Zr + Nb + Ce + Y$ 两套标准。之所以不采用后一种, 是因为随着分异程度的增加, 铝质 A 型花岗岩中的 Zr 含量会发生显著下降, 一些高分异铝质 A 型花岗岩中的 $w(Zr)$ 甚至低于 200×10^{-6} (King et al., 1997; Rajesh, 2000; 邱检生等, 2000)。Zr 含量太低会直接影响以 $Zr + Nb + Ce + Y$ 为横坐标的判别图解的可靠性, 因为其中 Zr 所占的比例较大, 所以产生的影响是非常明显的 (李小伟等, 2010)。而锡田岩体正是一个高分异的 A 型花岗岩。因为当 $w(Rb)$ 高于 $250 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 时就属于高分异的情况, 在这种情况下, Sr 值会很低。例如 McCarthy 等 (1976) 的研究结果表明, 分异的花岗岩熔体 $w(Rb)$ 可达约 700×10^{-6} 而 $w(Sr)$ 小于 10×10^{-6} 。锡田岩体印支期花岗岩 $w(Rb)$ 为 $284 \times 10^{-6} \sim 483 \times 10^{-6}$, 而 $w(Sr)$ 为 $49 \times 10^{-6} \sim 182 \times 10^{-6}$

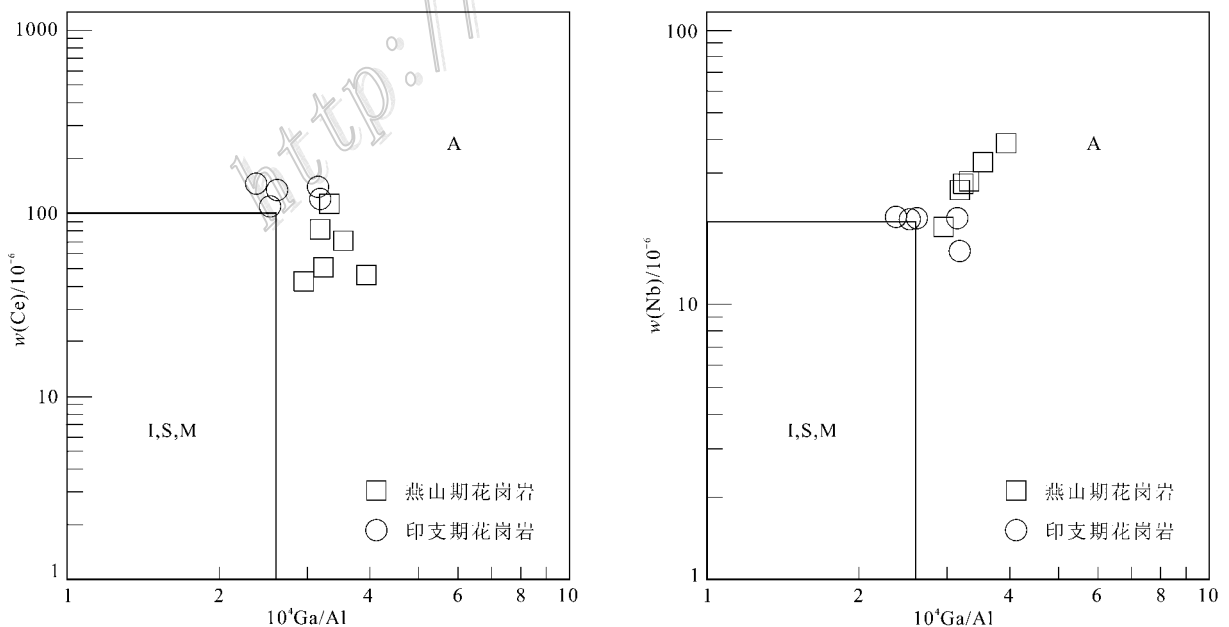


图 9 锡田岩体 A 型花岗岩判别图解 (底图据 Whalen et al., 1987)

Fig. 9 A-type granite discrimination diagram of Xitian granite (after Whalen et al., 1987)

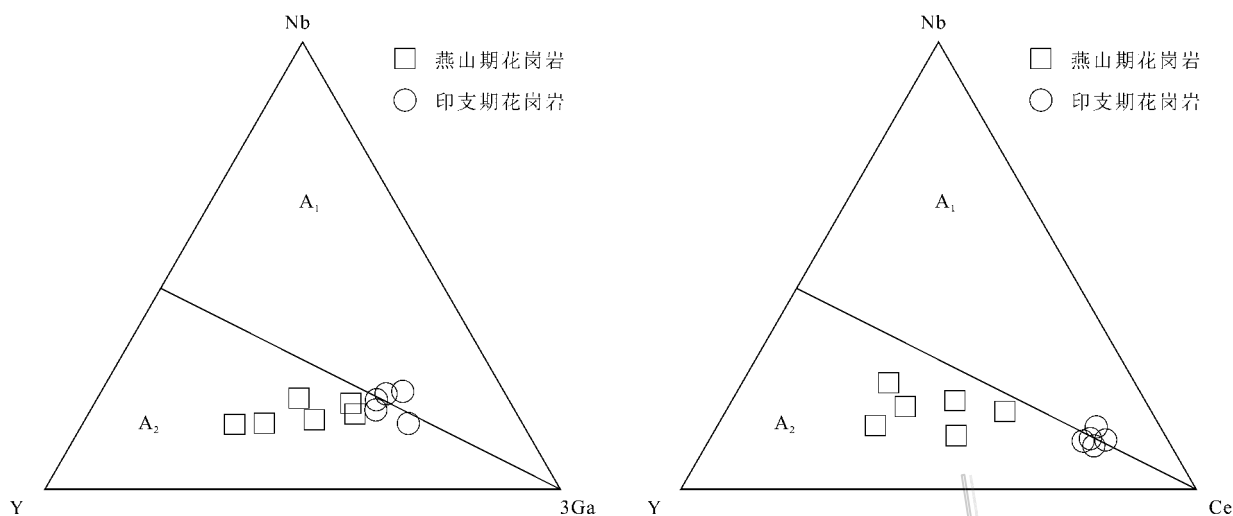


图 10 锡田岩体 A 型花岗岩亚类判别图解(底图据 Eby, 1990)

Fig. 10 A-type granite subclass discrimination diagram of Xitian granite (after Eby, 1990)

(仅一个数据为 320×10^{-6}); 燕山期花岗岩 $w(\text{Rb})$ 为 $382 \times 10^{-6} \sim 819 \times 10^{-6}$, 而 $w(\text{Sr})$ 为 $10 \times 10^{-6} \sim 43 \times 10^{-6}$ (表 2)。由此可以看出, 锡田岩体印支期和燕山期花岗岩分别为中等分异和高分异花岗岩, 燕山期花岗岩比印支期花岗岩的分异程度显著偏高。另外, 分异所引起的 Zr 含量偏低同时也影响了锆石饱和温度计 (Watson et al., 1983) 的计算。计算所得的印支期花岗岩的结晶温度为 $766 \sim 817^\circ\text{C}$, 燕山期为 $734 \sim 792^\circ\text{C}$ (表 2), 略低于 A 型花岗岩的形成温度 ($>800^\circ\text{C}$) (King et al., 1997; 刘昌实等, 2003)。但是, 由于锡田岩体的锆石在 CL 图像下未出现古老的核部, 可推测其形成时为完全熔融的高温环境 (Collins et al., 1982), 符合 A 型花岗岩的特征。

4.3 岩石成因与构造背景

前人研究表明, A 型花岗岩的成因比较复杂, 涉及的物源也种类繁多, 主要有: ① 幔源岩浆结晶分异 (Turner et al., 1992; Frost et al., 1997; 1999); ② 幔源岩浆与壳源岩浆混合 (Yang et al., 2006); ③ 地壳物质部分熔融 (Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987; Wu et al., 2002) 等几类。在这种情况下, 锆石 Hf 同位素可以有效地识别出花岗岩是否在岩浆混合作用下形成, 并为物质来源和成因机制提供制约 (Yang et al., 2007)。两期花岗岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值偏负 (图 8), 说明花岗岩源区还是以地壳物质为主, 有少量地幔物质参与成岩作用并形成铝质 A 型花岗岩。在南岭地区, 与锡矿有关的花岗岩大多数都存在地幔物质参与成岩的迹象, 如花山-姑婆山、九嶷

山、骑田岭、千里山和荷花坪等岩体。在锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄相关图解 (图 11) 上, 锡田岩体两期花岗岩均落入下地壳与平均地壳之间的区域, Hf 两阶段模式年龄集中在 $1.6 \sim 1.8 \text{ Ga}$, 主要来源于古元古代晚期地壳物质的部分熔融。其中, 一颗印支期花岗岩中的老锆石落在亏损地幔与球粒陨石之间, 其年龄为 1030 Ma , 与第一期花岗岩的成岩年代不同, 明显老于该花岗岩。同时, 该锆石年龄与本区基底的时代不同, 不可能为源区残留的继承锆石, 因此可能是来自于岩浆上升侵位过程中的捕获锆石。此外, 印支期花岗岩中广泛发育的闪长质包体无疑是岩浆混合的直接证据。这些暗色包体与第一期 A 型花岗岩具有类似的微量元素配分模式, 更加富含 HFSE 与成矿元素 (表 2, 图 7), 很有可能在花岗质岩浆与地幔岩浆相互作用的过程中提供了以上成分。

华南中生代时期先后历经两大构造运动, 即印支运动 (早中生代) 和燕山运动 (晚中生代)。首先发生的印支造山运动以 $258 \sim 243 \text{ Ma}$ 期间 Sibumasu 地块与印支板块-华南板块的碰撞增生为代表, 并在 245 Ma 左右造成东特提斯洋的关闭 (Carter et al., 2001)。它不仅使华南内部发生了以碰撞-挤压-推覆-隆升为主的印支造山运动, 也推动了华北板块和华南板块在印支期完成碰撞拼合, 并形成中国大陆。丁兴等 (2005) 注意到印支期花岗岩年龄显示了明显的双峰式分布特征, 年龄值大致分布在大于 230 Ma (印支早期) 和 $200 \sim 225 \text{ Ma}$ (印支晚期) 两个区段, 前者主要分布在琼、桂、粤、闽一带而后者广泛发育

在湖南境内。许多学者认为印支期内发生了挤压-伸展的构造环境转换,印支晚期花岗岩是局部伸展环境下的后碰撞花岗岩(Zhou et al., 2006; Wang et al., 2007; 于津海等, 2007)。由于A型花岗岩形成于伸展的构造背景这一结论已得到大多数学者的认可,因此可指示这种构造环境转换。但是,华南印支期花岗岩90%以上为过铝质I型或S型花岗岩,其中强过铝质花岗岩占印支期花岗岩的72.7%(孙涛, 2006),因而印支期A型花岗岩的报道很少。李万友等(2012)将浙西南靖居花岗岩体确定为A型花岗岩并认为至少在215 Ma时浙西南地区就处于伸展的构造背景下。锡田印支期A型花岗岩的确定,表明在220 Ma左右,湘东南也处于伸展的构造背景下。同区220 Ma左右的镁铁质岩浆活动(郭峰等, 1997)表明在此时已经有岩石圈的拉张和地幔物质上涌,由此造成的下地壳部分熔融是锡田印支期A型花岗岩的成因。

华南地区在经历了200~185 Ma的岩浆活动沉寂期(Zhou et al., 2006)之后,于185 Ma左右开始进入一个以岩石圈“伸展-减薄”为主的地球动力学

环境,这也是一个花岗质岩浆活动及相关的金属成矿作用大爆发的新时期(毛景文等, 2004; 2007; 华仁民等, 2005a)。其中,南岭中西段发育的北东向的燕山早期含钨锡A型花岗岩带的确定(朱金初等, 2008)是近年来花岗岩与成矿关系研究的重要进展之一。该带主要由花山、姑婆山、九嶷山、骑田岭等花岗质岩基和周边岩株群所组成,成岩年龄集中在165~153 Ma并有从西南向北东变年轻的趋势(蒋少涌等, 2008)。锡田燕山期A型花岗岩的成岩年龄154 Ma正处于此范围内,因而将此带进一步向北东方向延伸至湖南东部的湘赣交界处。同时,此带也是“钦-杭结合带”(“十-杭带”)(图1)的一部分。因为“十-杭带”是扬子陆块与华夏陆块在新元古代的碰撞对接带(Gilder et al., 1996),并且此后多次沿该带开合,所以它就成为地幔物质上涌加入地壳的一条重要通道(Chen et al., 1998; 陈江峰等, 1999; 郭新生等, 2001; 洪大卫等, 2002)。由于该区在150~160 Ma期间发生过一次强烈的岩石圈拉张、软流圈上涌事件(Li et al., 2004),所以造成了下地壳基底的再次熔融,形成燕山期A型花岗岩。它与印支期花岗岩具有

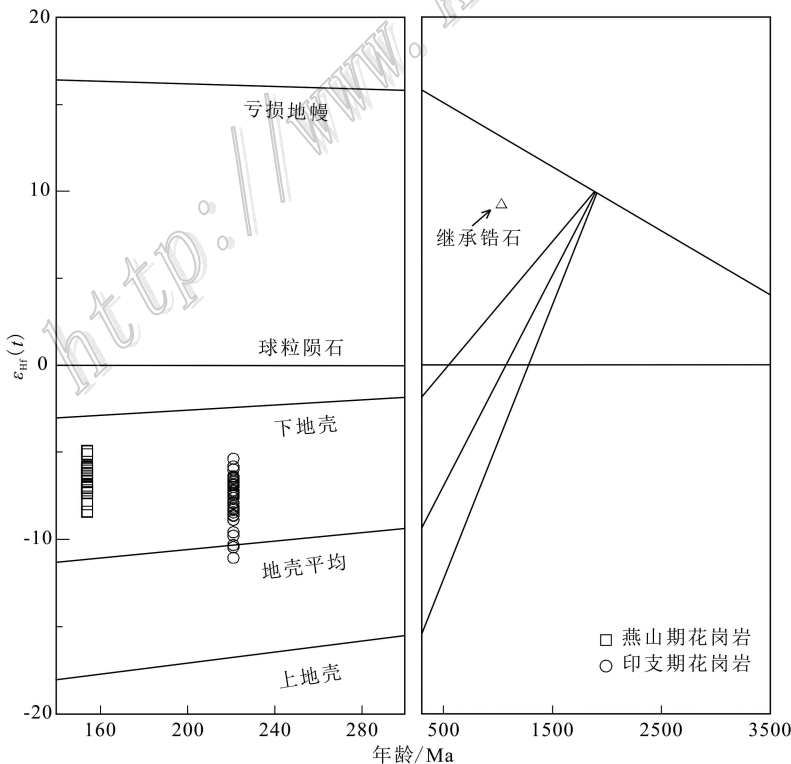


图 11 锡田岩体锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄相关图解

Fig. 11 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -age diagram of Xitian granite

相似的成分,并有更高的分异程度。与锡田印支期花岗岩所不同的是,本次拉张事件应与古太平洋板块的俯冲消减引起的弧后或弧内拉张有关(Jiang et al., 2006; 2009)而非印支期后碰撞或后造山伸展减薄所致。

5 结 论

(1) LA-ICP-MS 年代学结果再次证实了锡田岩体为一复式岩体。两个第一期中(细)粒斑状黑云母二长花岗岩样品的年龄分别为 (220.9 ± 0.6) Ma、 (220.7 ± 0.7) Ma; 第二期中细粒二云母二长花岗岩的年龄为 (154.4 ± 0.7) Ma。除燕山期花岗岩外,印支期花岗岩也很可能与锡钨矿化相关。

(2) 岩石学、矿物学、地球化学等特征显示锡田岩体印支、燕山两期花岗岩分别为中等分异、高分异的铝质 A 型花岗岩。印支期花岗岩略偏基性而燕山期花岗岩具有更高的分异程度。暗色包体的存在显示其在岩浆演化过程中存在岩浆混合作用。

(3) Hf 同位素特征显示锡田岩体的成因主要为岩石圈的拉张和地幔物质上涌,并由此造成的古元古代晚期地壳物质的部分熔融。由此可以推测湖南东部在晚三叠世左右即处于局部拉张环境,锡田印支期 A 型花岗岩属于印支构造运动后碰撞软流圈上涌和岩石圈伸展的响应;而锡田燕山期 A 型花岗岩的形成背景则是古太平洋板块的俯冲消减引起的弧后拉张。

志 谢 研究工作得到了湖南省地勘局四一六队伍式崇工程师,中国地质调查局武汉地质调查中心付建明研究员等的指导和帮助;湖南有色锡田矿业公司、湖南省地勘局四一六队在野外考察方面提供了极大便利;锆石阴极发光得到了南京大学内生金属矿床成矿研究国家重点实验室张文兰老师的帮助。两位匿名审稿人提出了大量宝贵的修改意见。在此一并表示衷心的感谢!

参考文献/References

蔡明海,陈开旭,屈文俊,刘国庆,付建明,印建平. 2006. 湘南荷花坪锡多金属矿床地质特征及铀钨矿 Re-Os 测年[J]. 矿床地质, 25(3): 263-268.

蔡新华,贾宝华. 2006. 湖南锡田锡矿的发现及找矿潜力分析[J]. 中

国地质, 33(5): 1100-1108.

陈江峰,郭新生,汤加富,周泰禧. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄[J]. 南京大学学报(自然科学), 35(6): 649-658.

丁 兴,陈培荣,陈卫锋,黄宏业,周新民. 2005. 湖南沩山花岗岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年:成岩启示及意义[J]. 中国科学(D 辑), 37: 606-616.

冯佳睿,毛景文,裴荣富,李 超. 2011. 滇东南老君山地区印支期成矿事件初探[J]. 矿床地质, 30(1): 57-73.

付建明,伍式崇,徐德明,马丽艳,程顺波,陈希清. 2009. 湘东锡田钨锡多金属矿区成岩成矿时代的再厘定[J]. 华南地质与矿产, 3: 1-7.

郭春丽,陈毓川,蔺志永,楼法生,曾载淋. 2011. 赣南印支期柯树岭花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及成因探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 40(4): 567-580.

郭 峰,范蔚茗,林 舸,林源贤. 1997. 湘南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨[J]. 科学通报, 42(15): 1661-1663.

郭新生,陈江峰,张 巽,汤加富,谢 智,周泰禧,刘玉龙. 2001. 桂东南富钾岩浆杂岩的 Nd 同位素组成: 华南中生代地幔物质上涌事件[J]. 岩石学报, 17(1): 19-27.

洪大卫,谢锡林,张季生. 2002. 试析杭州-诸广山-花山高 ϵ_{Nd} 值花岗岩带的地质意义[J]. 地质通报, 21(6): 348-354.

华仁民,陈培荣,张文兰,陆建军. 2005a. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用[J]. 矿床地质, 24(2): 99-107.

华仁民,陈培荣,张文兰,姚军明,林锦富,张展适,顾晟彦. 2005b. 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,李光来,张文兰,胡东泉,陈培荣,陈卫锋,王旭东. 2010. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探[J]. 矿床地质, 29(1): 9-23.

蒋少涌,赵葵东,姜耀辉,戴宝章. 2008. 十杭带湘南-桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论[J]. 高校地质学报, 14(4): 496-509.

李万友,马昌前,刘园园, Paul T Robinson. 2012. 浙江印支期铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义[J]. 中国科学, 42(2): 164-177.

李小伟,莫宣学,赵志丹,朱弟成. 2010. 关于 A 型花岗岩判别过程中若干问题的讨论[J]. 地质通报, 29(2-3): 278-285.

刘昌实,陈小明,陈培荣,王汝成,胡 欢. 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因[J]. 高校地质学报, 9(4): 573-591.

刘国庆,伍式崇,杜安道,付建明,杨晓君,汤质华,魏君奇. 2008. 湘东锡田钨锡矿区成岩成矿时代研究[J]. 大地构造与成矿学, 32(1): 63-71.

刘善宝,王登红,陈毓川,李建康,应立娟,许建祥,曾载淋. 2008. 赣南崇义-大余-上犹矿集区不同类型含锆石英中白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 82(7): 932-940.

龙宝林,伍式崇,徐辉煌. 2009. 湖南锡田钨锡多金属矿床地质特征及找矿方向[J]. 地质与勘探, 45(3): 229-234.

罗洪文,姜端午. 2005. 茶陵锡田地区锡矿成矿条件及找矿远景[J].

- 湖南地质, 22(1): 38-42.
- 马铁球, 王先辉, 柏道远. 2004. 锡田含 W, Sn 花岗岩体的地球化学特征及其形成构造背景[J]. 华南地质与矿产, 1: 11-16.
- 马铁球, 柏道远, 邝军, 王先辉. 2005. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 24(5): 415-419.
- 马丽艳, 付建明, 伍式崇, 徐德明, 杨晓君. 2008. 湘东锡田垄上锡多金属矿床⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素定年研究[J]. 中国地质, 35(4): 706-713.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 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.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 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): 2329-2338.
- 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 陈毓川. 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, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 85(5): 636-658.
- 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, Brent I A McInnes. 2000. 福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因[J]. 地球化学, 29(4): 313-321.
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. 地质通报, 25: 332-337.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 2000. 桐柏-大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. 岩石矿物学杂志, 19(4): 297-306.
- 伍式崇, 洪庆辉, 龙伟平, 罗 郟. 2009. 湖南锡田钨锡多金属矿床成矿地质特征及成矿模式[J]. 华南地质与矿产, 2: 1-6.
- 伍式崇, 龙自强, 曾桂华, 龙伟平. 2011. 湖南锡田地区锡铅锌多金属矿勘查主要进展及找矿前景[J]. 华南地质与矿产, 27(2): 100-104.
- 徐辉煌, 伍式崇, 余阳春, 谢友良, 龙伟平. 2006. 湖南锡田地区矽卡岩型钨锡矿床地质特征及控矿因素[J]. 华南地质与矿产, 2: 37-42.
- 徐平, 吴福元, 谢烈文, 杨岳衡. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. 科学通报, 49(14): 1403-1410.
- 杨锋, 李晓春, 冯佐海, 白艳萍. 2009. 栗木锡矿云英岩化花岗岩白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其地质意义[J]. 桂林工学院学报, 29(1): 21-24.
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. 中国地质, 36(3): 528-543.
- 于津海, O'Reilly S Y, 王丽娟, Griffin W L, 蒋少涌, 王汝成, 徐夕生. 2007. 华夏地块古老物质的发现和前寒武纪地壳的形成[J]. 科学通报, 52: 11-18.
- 曾桂华, 胡永哉, 余阳春. 2005. 湘东锡田垄上矽卡岩型锡多金属矿床地质特征及找矿前景[J]. 华南地质与矿产, 2: 68-72.
- 赵蕾, 于津海, 王丽娟, 谢磊, 孙涛, 邱检生. 2006. 红山含黄玉花岗岩的形成时代及其成矿能力[J]. 矿床地质, 25(6): 672-682.
- 朱金初, 陈骏, 王汝成, 陆建军, 谢磊. 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带[J]. 高校地质学报, 14(4): 474-484.
- 邹先武, 崔森, 屈文俊, 白云山, 陈希清. 2009. 广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿同位素定年研究[J]. 中国地质, 36(4): 837-844.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report 204Pb [J]. Chemical Geology, 192: 59-79.
- Black L P and Gulson B L. 1978. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory [J]. Journal of Australian Geology and Geophysics, 3: 227-232.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 148: 243-258.
- Boynton. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [A]. In: Henderson P, ed. Rare earth element geochemistry. Developments in geochemistry 2 [M]. Amsterdam. Elsevier. 115-1522.
- Carter A, Roques D, Bristow C and Kinny P. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian Orogeny) in Vietnam [J]. Geology, 29: 211-214.
- Chen J F and Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. Tectonophysics, 284: 101-133.
- Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, German C R, Bayon G and Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 17(12): 1567-1574.
- Collins W J, Beams S D, White A J R and Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 80(2): 189-200.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis [J]. Lithos, 26: 115-134.
- Franzini M, Leoni L and Saitta M. 1972. A simple method to evaluate the matrix effect in X-ray fluorescence analysis [J]. X-ray Spectrom, 1: 151-154.
- Frost C D and Frost B R. 1997. Reduced rapakivi-type granites: The tholeiite connection [J]. Geology, 25: 647-650.
- Frost C D, Frost B R, Chamberlain K R and Edwards B R. 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: A reduced, rapakivi-type anorogenic granite [J]. J. Petrol., 40: 1771-1802.
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao X X, Liu Z W, Wang G X, Yuan K R, Liu W L, Kuang G D and Wu H R. 1996. Isotopic and paleo-

- magnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China[J]. *J. Geophys. Res.*, 101: 16137-16154.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xua X S and Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237-269.
- Griffin W L, Powell W J, Pearson N J, et al. 2008. GLITTER: Data reduction software for laser ablation ICP-MS[A]. In: Sylvester P, ed. *Laser ablation-ICP-MS in the Earth Sciences: Current practices and outstanding issues* [C]. Mineralogical Association of Canada Short Course, 40: 308-311.
- He Z Y, Xu X S, Yu Y and Zou H B. 2009. Origin of the Late Cretaceous syenite from Yandangshan, SE China, constrained by zircon U-Pb and Hf isotopes and geochemical data [J]. *International Geology Review*, 51(6): 556-582.
- Heinrich C A. 1990. The chemistry of hydrothermal tin (-tungsten) ore deposition[J]. *Econ. Geol.*, 85: 457-481.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423-439.
- IUGS. 1973. Subcommittee on the systematics of igneous rocks: Plutonic rocks classification and nomenclature[J]. *Geotimes*, Oct: 26-30.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L and Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chem. Geol.*, 211: 47-69.
- Jiang Y H, Jiang S Y, Zhao K D and Ling H F. 2006. Petrogenesis of Late Jurassic Qianlishan granites and mafic dikes, Southeast China: Implication for a back-arc extension setting[J]. *Geol. Mag.*, 143: 457-474.
- Jiang Y H, Jiang S Y and Dai B Z. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China: Implications for a continental arc to rifting[J]. *Lithos*, 107(3-4): 185-204.
- King P L, White A J R, Chappell B W and Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371-391.
- Lehmann B. 1990. *Metallogeny of tin*[M]. New York: Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Le Maitre R W. 1989. *A classification of igneous rocks and glossary of terms* [M]. Blackwell, Oxford. 193p.
- Li X H, Chung S L, Zhou H W, Lo C H, Liu Y and Chen C H. 2004. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-eastern Guangxi: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for the tectonic evolution of SE China[J]. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 226: 193-215.
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 1: 468.
- Ludwig K R. 1991. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data[M]. U. S. Geological Survey Open-file Report, 39p.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101: 635-643.
- McCarthy T S and Hasty R A. 1976. Trace element distribution patterns and their relationship to the crystallization of granitic melts [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40(11): 1351-1358.
- Qi L, Hu J and Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 51: 507-513.
- Rajesh H M. 2000. Characterization and origin of a compositionally zoned aluminous A-type granite from South India[J]. *Geological Magazine*, 137(3): 291-318.
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium clock[J]. *Science*, 293: 683-687.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes (in magmatism in the ocean basins)[J]. *Geological Society Special Publications*, 42: 313-345.
- Taylor R G. 1979. *Geology of tin deposits* [M]. Amsterdam: Elsevier.
- Turner S P, Foden J D and Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Pathaway Ridge, South Australia [J]. *Lithos*, 28: 151-179.
- Wang Y J, Fan W M, Sun M, Liang X and Zhang Y. 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province[J]. *Lithos*, 96: 475-502.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited-temperature and composition effects in a variety of crustal magma types [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 64: 295-304.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-Type granites: Geochemical characteristics discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419.
- Wu F Y, Sun D Y, Li X H, Jahn B M and Wilde S. 2002. A-type granites in Northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chem. Geol.*, 187: 143-173.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. *Chem. Geol.*, 234: 105-126.
- Wu J, Liang H Y, Huang W T, Wang C L, Sun W D, Sun Y L, Li J, Mo J H and Wang X Z. 2012. Indosinian isotope ages of plutons

- and deposits in southwestern Miaocershan-Yuechengling, northeastern Guangxi and implications on Indosinian mineralization in South China[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 57(9): 1024-1035.
- Yang J H, Wu F Y, Chung S L, Wilde S A and Chu M F. 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence[J]. *Lithos*, 89: 89-106.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Xie L W, Yang Y H and Liu Xiao M. 2007. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153(2): 177-190.
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, Zong C L, Günther D, Fontaine G H, Liu X M and Diwu C R. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadruple and multiple-collector ICP-MS [J]. *Chem. Geol.*, 247:100-118.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S and Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 29(1): 26-33.
- Zhang H F, Lu J J and Zhang R Q. 2013. Geochemistry, zircon U-Pb dating and Nd-Hf isotopic composition of the Daqiling intrusion in the Limu Sn-polymetallic orefield, Guangxi Province[J]. *Science in China (Earth Sciences)*, Accepted.

<http://www.kcdz.ac.cn/>