湘南王仙岭花岗岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其地质意义*

郑佳浩[1] 郭春丽[2]

ZHENG JiaHao[1] and GUO ChunLi[2]

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室,中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083
2. 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实验室,北京 100037

1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources*, *School of Earth Sciences and Resources*, *China University of Geosciences*, *Beijing* 100083, *China*
2. *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment*, *Institute of Mineral Resources*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*

2011-08-12 收稿, 2011-12-03 改回.

Zheng JH and Guo CL. 2012. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotopes of the Wangxianling granitic intrusion in South Hunan Province and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1):75 – 90

Abstract The Wangxianling intrusion in South Hunan Province consists of two granitoids, the main tourmaline biotite granites and the biotite monzonite granites invading into the former. LA-MC-ICP MS zircon U-Pb dating shows that tourmaline biotite granites formed in Indosinian (235.0 ± 1.3Ma) while the biotite monzonite granites formed in Yanshanian (155.9 ± 1.0Ma), indicating that Wangxianling intrusion is the product of two-time magmatic activities. The compositions of these two period granites fall into the calc-alkaline category, with an A/CNK ratio of 1.07 ~ 1.66, which are peraluminous to strongly peraluminous granites. Their whole rock rare earth elements demonstrate total LREE enrichment and HREE deficit with significant negative Eu anomalies(0.01 ~ 0.38). The $\varepsilon_{Hf}(t)$ values and two-staged Hf model ages of tourmaline biotite granites and biotite monzonite granites are −7.92 ~ +4.61, 1758 ~ 967Ma and −10.66 ~ −5.35, 1875 ~ 1538Ma, respectively. In this paper we suggest that both the tourmaline biotite granite and biotite monzonite granite are originated from the Paleo-and Mesoproterozoic crustal remelting, and the earlier tourmaline biotite granites captured a large number of mantle-derived zircons and there were high-$\varepsilon_{Hf}(t)$ materials in its source region. Combined with previous research results, we infer that the both Indosinian and Yanshanian periods in South China have tungsten and tin mineralization, the Indosinian granitic magma formed in interval lithosphere extensional environment during the collision compression while the Yanshanian granitic magma formed in the extensional environment of the back arc continental margin.

Key words LA-MC-ICP MS zircon U-Pb dating; Geochemistry; Zircon Hf isotopes; Wangxianling granitic intrusion; South China

摘 要 湘南王仙岭岩体由主体电气石黑云母花岗岩和侵入其内部的黑云母二长花岗岩组成,LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 定年显示电气石黑云母花岗岩形成于印支期(235.0 ± 1.3Ma),黑云母二长花岗岩形成于燕山期(155.9 ± 1.0Ma),表明该岩体是两期岩浆活动的产物。这两期岩石均为高钾钙碱性系列,A/CNK 值为 1.07 ~ 1.66,属过铝-强过铝质花岗岩类。稀土元素显示 LREE 富集,HREE 亏损,Eu 负异常明显(0.01 ~ 0.38)的特征。早期电气石黑云母花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值分别为 −7.92 ~ +4.61 和 −10.66 ~ −5.35;两阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})分别为 1758 ~ 967Ma 和 1875 ~ 1538Ma。两期花岗岩均来自于古中元古代地壳物质重熔,其中早期电气石黑云母花岗岩在侵位上升过程中捕获了部分幔源老锆石,成岩过程中有少量地幔物质参与,且其源区具有高 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值的特点。综合前人研究成果,本文认为华南中生代印支期和燕山期均有钨锡矿化作用,印支期花岗质岩浆形成于碰撞挤压作用间隙伸展环境,而燕山期花岗质岩浆可能形成于大陆边缘弧后伸展环境。

* 本文受国土资源部公益性行业科研专项(200911007-11)和国家自然科学重点基金项目(40930419)联合资助.

第一作者简介: 郑佳浩,男,1987 年生,硕士生,矿床学与矿床地球化学专业,E-mail:joey-zen@163.com

关键词 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄;岩石地球化学;锆石 Hf 同位素;王仙岭岩体;华南
中图法分类号 P588.121; P597.3

1 引言

华南地区广泛出露多期花岗岩类,其中中生代花岗质岩体与内生金属矿床的形成密切相关(毛景文等,2007,2008;华仁民和毛景文,1999;华仁民等, 2003)。燕山期花岗岩分布面积广泛且与金属矿产尤其是钨锡关系最为密切,为国内外地质界所瞩目(陈毓川等,1989),并取得了一系列研究成果(如 Zhou and Li, 2000; 周新民,2003;Zhou *et al.*, 2006)。与燕山期花岗岩相比,印支期花岗岩数量少且成矿作用相对较弱,虽然近年来对该期花岗岩的认识取得了长足的进展(孙涛等,2003;王岳军等,2002,2005),但是相比燕山期花岗岩,研究还不够深入,尤其是两期花岗岩的演化和时空关系有待于进一步探讨。王仙岭岩体位于南岭中段的湘南地区,在其周围分布着一系列钨锡多金属矿床,以往研究认为该岩体形成于印支期(湘南地质队,1983①;Wei *et al.*, 2007),与其相关的锡成矿年龄也是印支期(224 ± 1.9Ma,蔡明海等,2006)。本文通过 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 定年获得了 235.0 ± 1.3Ma 和 155.9 ± 1.0Ma 两期年龄,表明该岩体有印支期和燕山期两期岩浆活动。本文通过岩石地球化学、锆石 Hf 同位素,对该岩体印支期和燕山期两期岩相进行了详细解剖,并结合前人对该岩体和区域研究资料,进一步深入探讨华南早中生代构造运动与岩浆作用的关系。

2 区域地质背景和岩体地质特征

2.1 湘南区域地质背景

湘南地区位于华夏地块和扬子地块的接合部位。本区构造格架大体是加里东期震旦系-奥陶系地层形成 NWW 向至近 EW 向褶皱基底,之后印支运动形成了大量以 EW 向为主的断裂与褶皱,燕山运动形成了 NNE 向为主的陆相盆地。区内地层发育较全,除志留系缺失外,从震旦系到第四系均有出露。震旦系主要为砂岩、石英砂岩和板岩,寒武系主要为一套浅变质碎屑岩,奥陶系主要是泥、砂质沉积形成的类复理石建造,泥盆系在湘南广泛分布,为陆相至滨海相沉积碎屑岩、砂页岩和碳酸盐岩,是区内重要的含矿层位。石炭系主要为浅海相碳酸盐岩沉积,三叠系在区内出露很少,主要为碳酸盐岩、页岩,侏罗系在区内分布广泛,主要为陆相-海相交互沉积,白垩纪在区内出露较少,主要为陆相沉积。

湘南地区岩浆活动频繁,岩石种类繁多,有酸性岩、中性岩和基性岩。以酸性岩最为发育,占岩浆岩总面积的 90% 以上,绝大部分为侵入岩,喷出岩极少。按时代由老至新可划分为加里东期、印支期、燕山期侵入体。加里东期岩石类型主要为花岗闪长岩、辉石闪长岩、英云闪长岩,印支期岩石类型主要有二长花岗岩、花岗闪长岩等。燕山早期岩浆活动最为强烈,区内广泛发育,岩性主要为黑云母花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩等(据湖南省区域地质测量队,1969②)。

2.2 王仙岭岩体地质特征

王仙岭岩体位于湖南省郴州市东南约 10km 处,出露面积 19.7km^2,北大南小,呈倒葫芦状,NNE 向展布,侵入泥盆系灰岩、砂岩和石炭系灰岩、白云岩(图 1)。区内构造以 NE 向张扭性断裂和不同地层岩性界面附近的层间滑动构造为主,并控制了区内锡多金属矿化的空间分布和花岗斑岩脉的产出。岩体内部蚀变作用十分普遍,以云英岩化和硅化为主。在岩体周边围岩中主要有大理岩化、矽卡岩化等蚀变,其中大理岩化一般产于外接触带碳酸盐岩中;矽卡岩化在地表零星出露,钻探工程显示在深部接触带一般都有矽卡岩存在。在王仙岭花岗岩与中泥盆统棋梓桥组底部不纯灰岩及控矿断裂构造三者交汇部位,往往形成富厚的锡多金属矿体。

根据岩相可将王仙岭岩体分为主体的电气石黑云母花岗岩(图 2a)和侵入其中的黑云母二长花岗岩岩株(图 2d)。主体电气石黑云母花岗岩又可以进一步分为中心的中粗粒电气石黑云母花岗岩和边缘的细中粒电气石黑云母花岗岩。电气石黑云母花岗岩的云英岩化蚀变,表现为长石受热液作用分解成为石英和白云母(图 2b),电气石含量少且颗粒细小;硅化蚀变多见于采矿坑口,与矿化关系密切,表现为主要由石英和电气石组成,电气石颗粒粗大且自形(图 2c)。

电气石黑云母花岗岩为中、粗粒,灰色,块状构造,主要矿物成分为钾长石(35% ~40%),斜长石(30% ~35%)、石英(20% ~30%)、黑云母(3% ~5%)、白云母(1%)和电气石(1% ~3%)(图 3a),副矿物为锆石、磷灰石、榍石、钛铁矿、独居石等。钾长石呈自形-半自形板状,卡氏双晶。斜长石呈半自形板状,聚片双晶。黑云母呈片状,黄色-褐色,多色性明显。电气石为黑色,自形-半自形柱状,干涉色明显。石英呈半自形-它形粒状填充在其它矿物之间。其中云英岩化花岗岩为白色,块状构造,主要矿物为石英(70% ~80%)、白云母(10% ~15%)、电气石(5% ~10%),绢云母(5%)(图 3b)。硅化花岗岩为白色,块状构造,以石英(70% ~80%)和电气石(15% ~25%)为主,含少量绢云母(图 3c)。

黑云母二长花岗岩为细粒、等粒结构,块状构造。主要矿物成分为钾长石(25% ~30%)、斜长石(30% ~35%)、石英(25% ~35%)、黑云母(3% ~5%),副矿物为锆石、磷灰石、榍石、钛铁矿、磁铁矿、独居石等。钾长石表面较新鲜,斜长石表面有部分蚀变,黑云母呈片状且发生绿泥石化,有铁

① 湘南地质队. 1983. 郴县幅 1∶5 万区域地质调查报告. 1 - 159
② 湖南省区域地质测量队. 1969. 郴县幅 1∶20 万地质报告. 1 - 89

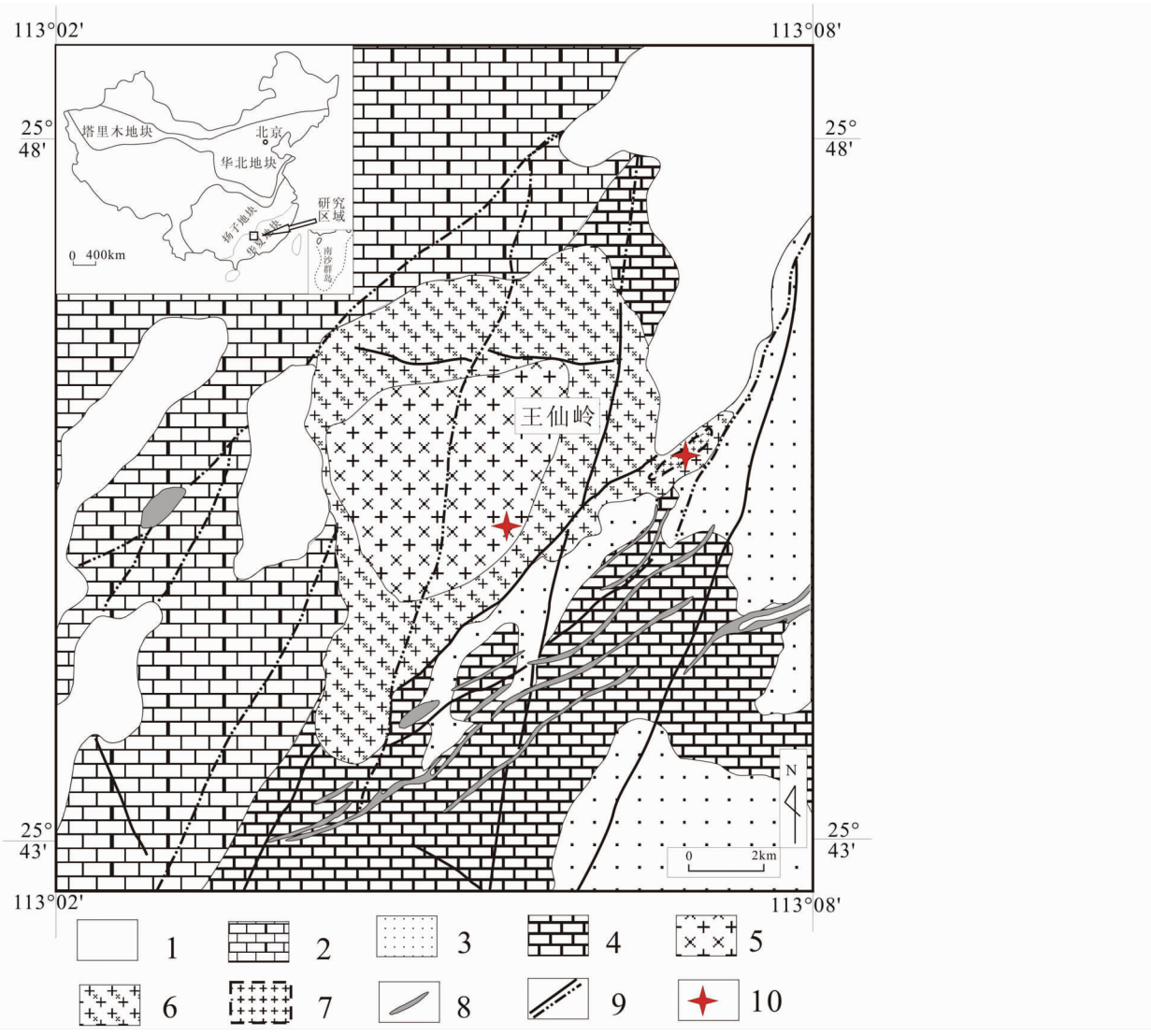


图 1 王仙岭岩体地质图(据湘南地质队,1983 改编)

1-第四系沉积物; 2-石炭系灰岩、白云岩; 3-泥盆系砂岩; 4-泥盆系灰岩; 5-中粗粒电气石黑云母花岗岩;6-细中粒电气石黑云母花岗岩; 7-黑云母二长花岗岩; 8-花岗斑岩脉; 9-断层及推测断层; 10-锆石定年样品采样位置

Fig. 1 Geological map of the Wangxianling intrusion

1-Quaternary sediments; 2-Carboniferous limestones and dolomites; 3-Devonian sandstones; 4-Devonian limestones; 5-medium-coarse tourmaline biotite granites; 6-fine medium tourmaline biotite granites; 7-biotite monzonitic granites; 8-granite dikes; 9-faults and presumed faults; 10-sampling locations of zircon U – Pb dating in Wangxianling

质析出(图 3d)。

3 样品分析方法

3.1 岩石主、微量元素分析方法

将新鲜岩石碎成 200 目以下的粉末,主量、微量、稀土元素在国家地质实验测试中心完成。除 FeO 以外的其它主量元素测试称取样品 0.5000g,用无水四硼酸锂和硝酸铵为氧化剂,于 1200℃ 左右熔融制成玻璃片,使用 X-荧光光谱仪(3080E)上测定。此方法精密度 RSD < 2% ~ 8%,检测下限为 0.01%。测定 FeO 时,称取试样 0.1000 ~ 0.5000g 于聚四氟坩埚中,加入氢氟酸和硫酸分解样品,重铬酸钾标准溶液滴定 FeO 含量,此方法精密度 RSD < 10%,检测下限为 0.05%。用所测 $Fe_2O_3^T$ 和 FeO 含量计算 Fe_2O_3 含量,公式为 $W_{Fe_2O_3} = W_{TFe_2O_3} - W_{FeO} \times 1.11134$。

测定包含稀土元素在内的微量元素时,称取试样 0.0250g 置于封闭溶样器 Teflon 内罐中,加入 HF、HNO_3 装入钢套中,于 190℃ 恒温 24h,取出冷却后,在电热板上蒸干,加入 HNO_3 再次封闭溶样 3h,溶液转入洁净塑料瓶中,溶液使用热电公司电感耦合等离子质谱(ICP-MS)测定。选用不同基体和不同含量的国家一级地球化学标准物质进行标定,其方法精密度 RSD < 2% ~ 10%,检测下限为 0.05×10^{-6}。

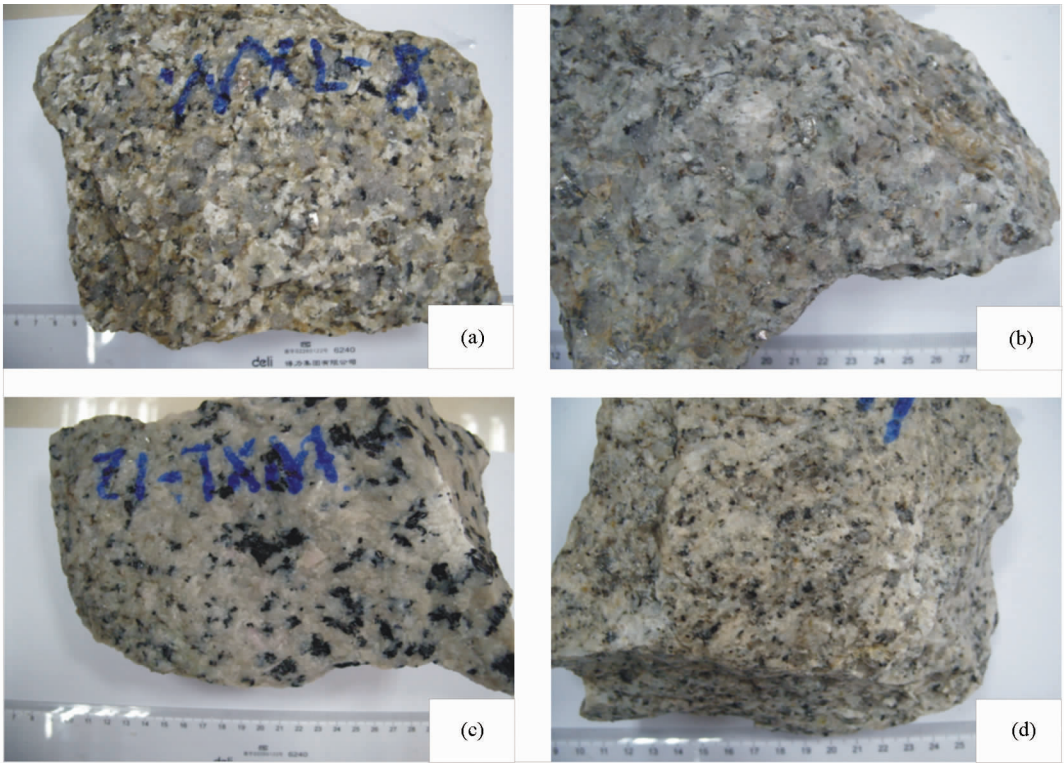


图 2 王仙岭岩体主要岩相类型手标本照片

(a)-电气石黑云母花岗岩; (b)-云英岩化电气石花岗岩(含少量电气石); (c)-云英岩化电气石花岗岩(含大量电气石); (d)-黑云母二长花岗岩

Fig. 2 Main lithofacies of the Wangxianling intrusion

(a)-tourmaline biotite granite; (b)-greisenization tourmaline granite (contain less tourmaline); (c)-greisenization tourmaline granite (contain lots of tourmaline); (d)-biotite monzonitic granite

3.2 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 分析方法

用于 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 测年的花岗岩样品采样点位置见图 1。锆石 U-Pb 测年在中国地质科学院矿产资源研究所 LA-MC-ICP MS 实验室进行。锆石定年分析所用仪器为 Neptune 型 MC-ICP MS 及其配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用的斑束直径为 25μm, 频率为 10Hz, 能量密度约为 2.5J/cm^2, 以 He 为载气。信号较小的 ^{207}Pb, ^{206}Pb, ^{204}Pb($^{+204}$Hg), ^{202}Hg 用离子计数器接收, 实现了所有目标同位素信号的同时接收并且不同质量数的峰基本上都是平坦的, 进而可以获得高精度的数据。锆石颗粒 ^{207}Pb/^{206}Pb, ^{206}Pb/^{238}U, ^{207}Pb/^{235}U 的测试精度(2σ)均为 2%左右, 锆石标准的定年精度和准确度在 1%(2σ)左右。LA-MC-ICP MS 采用单点剥蚀的方式, 数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器, 使之达到最优状态。锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, U, Th 含量以锆石 M127 为外标进行校正。以 Plesovice 锆石标样实时监控仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal4.3 程序(Liu *et al.*, 2008)。^{206}Pb/^{204}Pb > 1000 的分析结果未进行普通铅校正, 可能受包体等普通 Pb 影响的 ^{204}Pb 含量异常高的分析点, 在计算时剔除。锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.2 程序获得。详细实验过程见侯可军等(2009)。

3.3 LA-MC-ICP MS 锆石 Hf 同位素分析方法

锆石进行 U-Pb 年龄测定后, 再在原位用 LA-MC-ICP MS 进行 Lu-Hf 同位素分析, 测试在中国地质科学院矿产资源研究所 LA-MC-ICP MS 实验室进行。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 剥蚀直径为 55μm, 测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质, 分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军(2007), Elhlou *et al.* (2006)。分析过程中锆石标准 GJ1 的 ^{176}Hf/^{177}Hf 测试加权平均值为 0.282008 ± 0.000025(2σ, n = 26)(侯可军等, 2010)。

4 分析结果

4.1 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 分析结果

两个定年样品为电气石黑云母花岗岩(WXL-4)和黑云

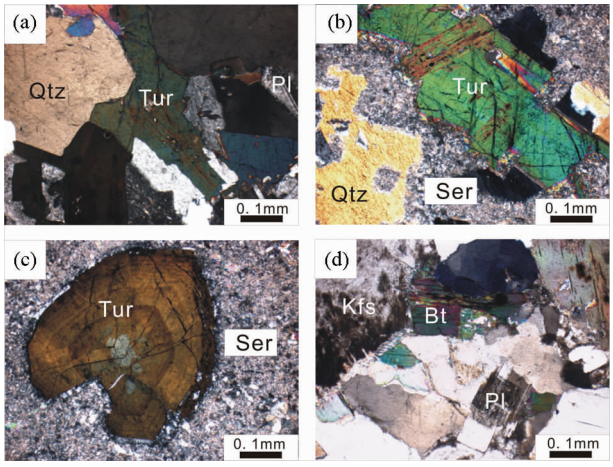


图 3　王仙岭岩体早期电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的显微镜下照片

(a)-早期电气石黑云母花岗岩中斜长石(Pl)的聚片双晶和柱状电气石(Tur);(b)-早期云英岩化电气石花岗岩中电气石和绢云母(Ser);(c)-早期云英岩化电气石花岗岩中具环带构造的电气石和细小的绢云母;(d)-晚期黑云母二长花岗岩中斜长石稍有蚀变,黑云母(Bt)中有铁质析出

Fig. 3　Microphotographs of tourmaline biotite granites, greisenization tourmaline granites and the late period of biotite monzonitic granites of the Wangxianling intrusion

(a)-polysynthetic twinned crystal of plagioclase and columnar tourmaline in tourmaline biotite granites; (b)-columnar tourmaline and sericite in greisenization tourmaline granites; (c)-zonal structure of tourmaline in greisenization tourmaline granites; (d)-slightly alteration of plagioclase and Fe precipitation of biotite in biotite monzonitic granites

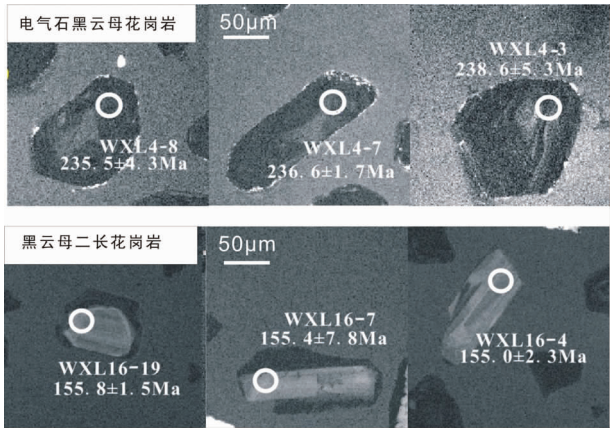


图 4　王仙岭岩体早期电气石黑云母花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的代表性锆石 CL 图像及测年位置点

Fig. 4　Cathodoluminescence images of zircon and site of analyzed points from the tourmaline biotite granites and the biotite monzonitic granites of the Wangxianling intrusion

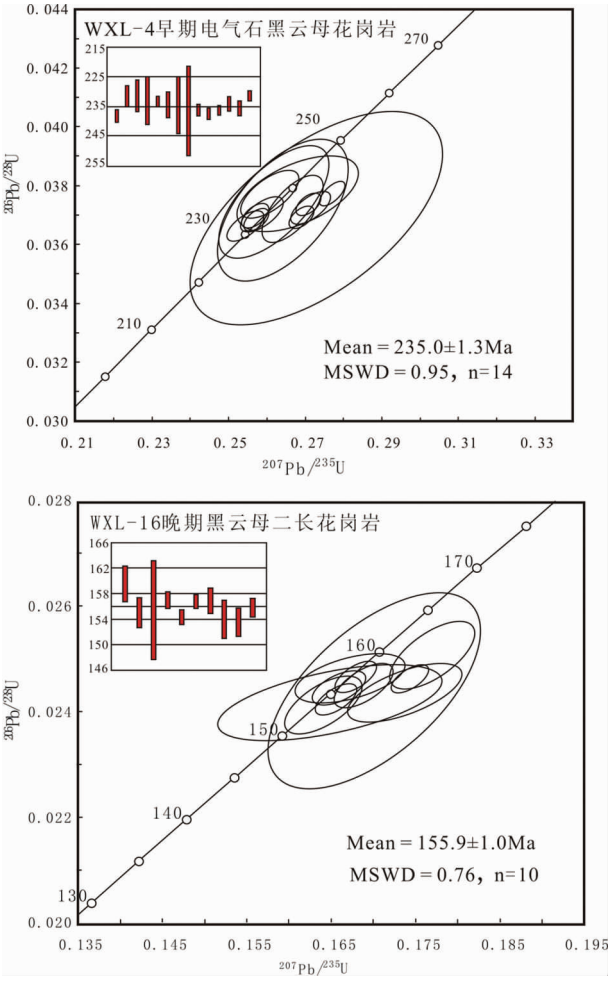


图 5　王仙岭电气石黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩锆石 $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和图

Fig. 5　Zircon $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ concordia diagram of the Wangxianling tourmaline biotite granite and biotite monzonitic granite

母二长花岗岩(WXL-16),采样位置分别为 N25°44′49. 9″,E113°05′19. 5″、N25°45′36. 5″,E113°06′45. 2″(图 1)。年龄结果见表 1,王仙岭岩体代表性锆石见图 4。

两个样品的阴极发光图像显示,电气石黑云母花岗岩(WXL-4)的锆石大部分呈短柱状,晶形比较完整,颗粒大小不一,部分锆石岩浆结晶环带发育,为岩浆成因。黑云母二长花岗岩(WXL-16)锆石晶形稍差,部分锆石环带结构清晰,略具熔蚀现象。

电气石黑云母花岗岩(WXL-4)共测定 14 个点,分布于 231. 7 ~ 238. 6Ma,且均落在谐和线上(图 5),说明 231. 7 ~ 238. 6Ma 代表岩浆结晶时间,14 个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 235. 0 ± 1. 3Ma(MSWD = 0. 95)。黑云母二长花岗岩(WXL-16)共测定 10 个点,分布于 154. 0 ~ 159. 5Ma,且均落在谐和线上,代表岩浆结晶时间。10 个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 155. 9 ± 1. 0Ma(MSWD = 0. 95)。

表 1　王仙岭岩体的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年结果

Table 1　Results of LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Wangxianling granites

序号	测点号	U	Th	$^{232}Th/^{238}U$	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$		$^{207}Pb^*/^{235}U$		$^{206}Pb^*/^{238}U$		$^{206}Pb/^{238}U$(Ma) ± 1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$(Ma) ± 1σ	$^{207}Pb/^{235}U$(Ma) ± 1σ
		($\times10^{-6}$)			测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	年龄	年龄	年龄
WXL-4 电气石黑云母花岗岩													
1	WXL-4-1	2047	704.1	0.34395	0.05039	0.00048	0.25429	0.00334	0.0366	0.00033	231.7 ± 2.1	213.0 ± 22.2	230.1 ± 2.7
2	WXL-4-2	3124	4495	1.43876	0.05019	0.00033	0.26084	0.00485	0.03768	0.00055	238.5 ± 3.4	211.2 ± 16.7	235.3 ± 3.9
3	WXL-4-3	1945	262.2	0.13482	0.05154	0.00096	0.26812	0.01029	0.03771	0.00086	238.6 ± 5.3	264.9 ± 42.6	241.2 ± 8.2
4	WXL-4-4	2384	1685	0.70692	0.05993	0.00728	0.26202	0.00945	0.03744	0.00128	236.9 ± 8.0	611.1 ± 260.9	236.3 ± 7.6
5	WXL-4-7	5175	556.3	0.10749	0.05256	0.00016	0.27094	0.00222	0.03739	0.00027	236.6 ± 1.7	309.3 ± 7.4	243.4 ± 1.8
6	WXL-4-8	6294	2949	0.46864	0.05201	0.00018	0.26695	0.00527	0.03721	0.00069	235.5 ± 4.3	287.1 ± 9.2	240.3 ± 4.2
7	WXL-4-11	3979	921.8	0.23169	0.05143	0.00018	0.26436	0.01152	0.03719	0.00154	235.4 ± 9.6	261.2 ± 39.8	238.0 ± 9.2
8	WXL-4-13	7247	6001	0.82798	0.05358	0.00082	0.2731	0.02169	0.03689	0.00242	233.5 ± 15.1	353.8 ± 33.3	245.0 ± 17.3
9	WXL-4-14	2205	6664	3.02221	0.05044	0.00017	0.2567	0.00233	0.03693	0.00031	233.8 ± 1.9	216.7 ± 13.9	232.0 ± 1.9
10	WXL-4-15	2674	690.1	0.25804	0.05072	0.00016	0.25686	0.00232	0.03674	0.0003	232.6 ± 1.9	227.8 ± 7.4	232.1 ± 1.9
11	WXL-4-16	4765	491.0	0.10303	0.05297	0.00026	0.26921	0.00222	0.0369	0.00026	233.6 ± 1.6	327.8 ± 11.1	242.1 ± 1.8
12	WXL-4-17	3656	697.5	0.19076	0.05277	0.0002	0.27142	0.00335	0.03726	0.00039	235.9 ± 2.4	320.4 ± 9.3	243.8 ± 2.7
13	WXL-4-18	1563	625.5	0.40028	0.05082	0.00052	0.25876	0.00359	0.03702	0.00042	234.4 ± 2.6	231.6 ± 24.0	233.7 ± 2.9
14	WXL-4-20	5641.82	1473	0.26114	0.0533	0.00017	0.27687	0.00215	0.0377	0.00027	238.6 ± 1.7	342.7 ± 2.8	248.2 ± 1.7
WXL-14 云英岩化电气石花岗岩													
1	WXL-14-2	802.0	284.3	2.82156	0.05664	0.00022	0.56816	0.00438	0.07279	0.00052	452.9 ± 3.1	476.0 ± 4.6	456.8 ± 2.8
2	WXL-14-3	1645	178.1	9.23435	0.05132	0.00047	0.25857	0.00623	0.03652	0.00078	231.2 ± 4.9	253.7 ± 2.4	233.5 ± 5.0
3	WXL-14-6	851.1	1217	0.6992	0.05281	0.00085	0.26507	0.00541	0.03641	0.00048	230.5 ± 3.0	320.4 ± 41.7	238.7 ± 4.3
4	WXL-14-7	490.1	158.6	3.09022	0.05772	0.00035	0.55787	0.01132	0.06972	0.0009	434.5 ± 5.4	520.4 ± 13.0	450.1 ± 7.4
5	WXL-14-8	3133	957.9	3.27049	0.05255	0.00015	0.26401	0.0014	0.03643	0.00016	230.7 ± 1.0	309.3 ± 7.4	237.9 ± 1.1
6	WXL-14-9	730.8	317.2	2.30378	0.07006	0.00025	1.45301	0.02001	0.15034	0.00193	902.9 ± 10.8	931.5 ± 7.4	911.1 ± 8.3
7	WXL-14-11	632.5	203.5	3.10908	0.07126	0.00049	1.39938	0.0384	0.14228	0.00347	857.6 ± 19.6	964.8 ± 19.4	888.7 ± 19.3
8	WXL-14-12	1143	288.4	3.96091	0.05725	0.00034	0.55059	0.01181	0.06971	0.00132	434.4 ± 8.0	501.9 ± 17.6	445.4 ± 7.3
9	WXL-14-14	1233	127.9	9.63903	0.0515	0.00025	0.25882	0.00264	0.03646	0.00033	230.8 ± 2.1	264.9 ± 11.1	233.7 ± 2.1
10	WXL-14-15	257.9	165.6	1.55746	0.05607	0.00034	0.55846	0.00555	0.07229	0.00061	450.0 ± 3.6	453.8 ± 17.6	450.5 ± 3.6
11	WXL-14-17	460.3	148.2	3.10677	0.07556	0.00043	1.76812	0.02657	0.16971	0.00229	1010.5 ± 12.6	1083.3 ± 11.1	1033.8 ±9.7
12	WXL-14-18	329.8	331.6	0.9948	0.16539	0.00039	10.494	0.09988	0.46013	0.00415	2440.1 ± 18.3	2522.2 ± 3.7	2479.4 ±8.8
13	WXL-14-20	1669	633.1	2.63556	0.05156	0.00053	0.25879	0.00312	0.03642	0.00036	230.6 ± 2.2	264.9 ± 28.7	233.7 ± 2.5
WXL-16 黑云母二长花岗岩													
1	WXL-16-2	2556	66.16	0.02588	0.05128	0.00078	0.17695	0.00316	0.02505	0.00044	159.5 ± 2.8	253.8 ± 35.2	165.4.0 ± 2.7
2	WXL-16-4	277.6	138.4	0.49848	0.05168	0.00094	0.17369	0.00432	0.02434	0.00037	155.0 ± 2.3	272.3 ± 47.2	162.6 ± 3.7
3	WXL-16-7	1205	556.4	0.46158	0.05063	0.00078	0.17002	0.00822	0.02441	0.00123	155.4 ± 7.8	233.4 ± 35.2	159.4 ± 7.1
4	WXL-16-8	2033	944.2	0.46446	0.04944	0.00022	0.16799	0.00153	0.02465	0.00021	157.0 ± 1.3	168.6 ± 11.1	157.7 ± 1.3
5	WXL-16-9	738.6	281.5	0.38111	0.04959	0.00035	0.16555	0.00155	0.02423	0.00018	154.3 ± 1.2	176.0 ± 12.0	155.5 ± 1.3
6	WXL-16-10	1760	737.5	0.419	0.05133	0.00023	0.17432	0.00144	0.02463	0.00017	156.8 ± 1.1	253.8 ± 4.6	163.2 ± 1.2
7	WXL-16-11	386.8	207.7	0.53694	0.04921	0.00109	0.16711	0.00425	0.02463	0.00032	156.9 ± 2.0	166.8 ± 51.8	156.9 ± 3.7
8	WXL-16-15	120.1	136.1	1.13261	0.04951	0.00257	0.16488	0.00889	0.02418	0.00048	154.0 ± 3.0	172.3 ± 122.2	155.0 ± 7.7
9	WXL-16-18	299.8	137.9	0.45989	0.04947	0.00057	0.16405	0.00302	0.02411	0.00036	153.6 ± 2.3	168.6 ± 27.8	154.2 ± 2.6
10	WXL-16-19	410.8	182.9	0.44525	0.04933	0.00046	0.16597	0.00211	0.02446	0.00023	155.8 ± 1.5	164.9 ± 22.2	155.9 ± 1.8

注：Pb_c 和 Pb^* 分别表示普通铅和放射性铅，应用实测 ^{204}Pb 校正锆石中的普通铅，采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄

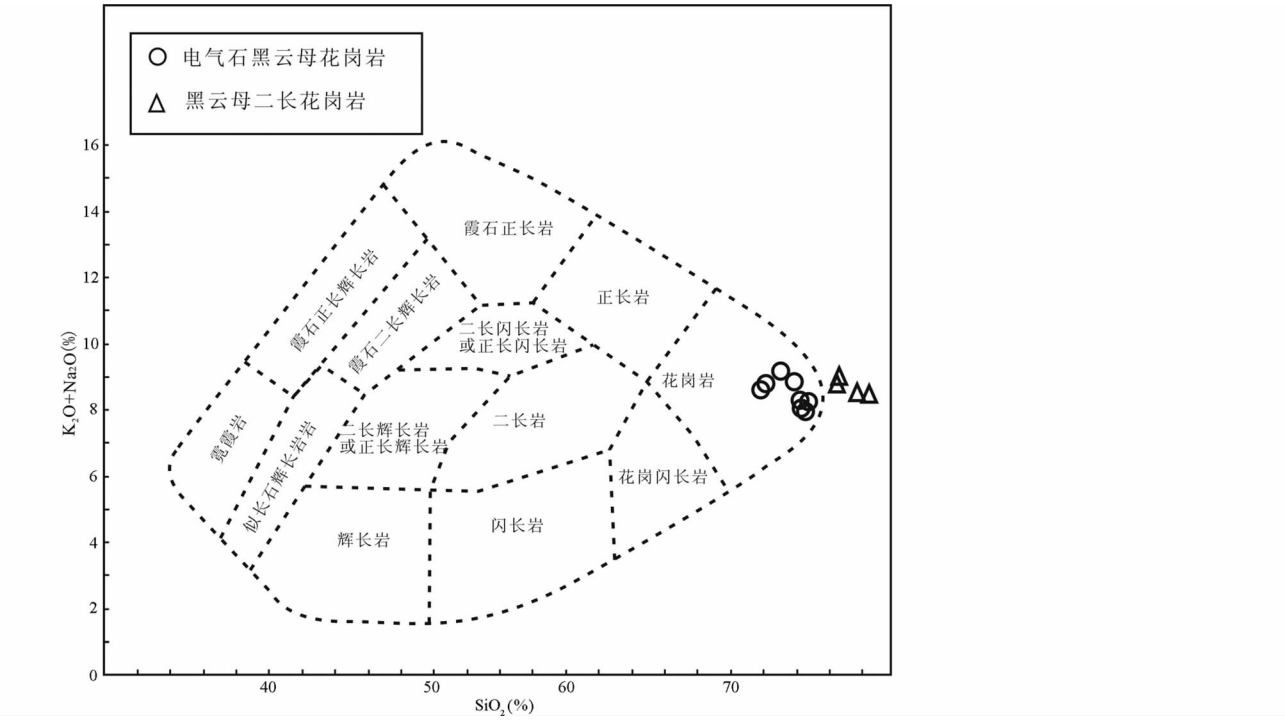


图 6　王仙岭电气石黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩的 SiO_2-Alk 分类命名图解(据 Cox, 1979)

Fig. 6　SiO_2 vs. Alk diagram of Wangxianling tourmaline biotite granite and biotite monzonitic granite (after Cox, 1979)

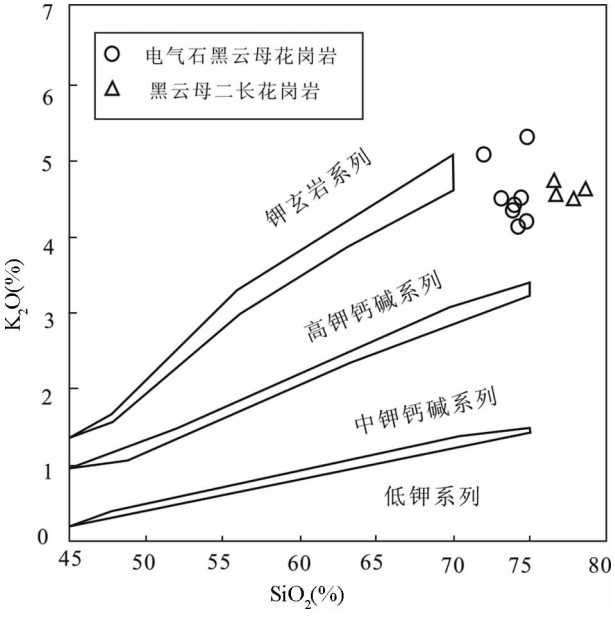


图 7　王仙岭电气石黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩的 SiO_2-K_2O 图解(据 Morrison, 1980)

Fig. 7　SiO_2 vs. K_2O diagram of the Wangxianling tourmaline biotite granite and biotite monzonitic granite (after Morrison, 1980)

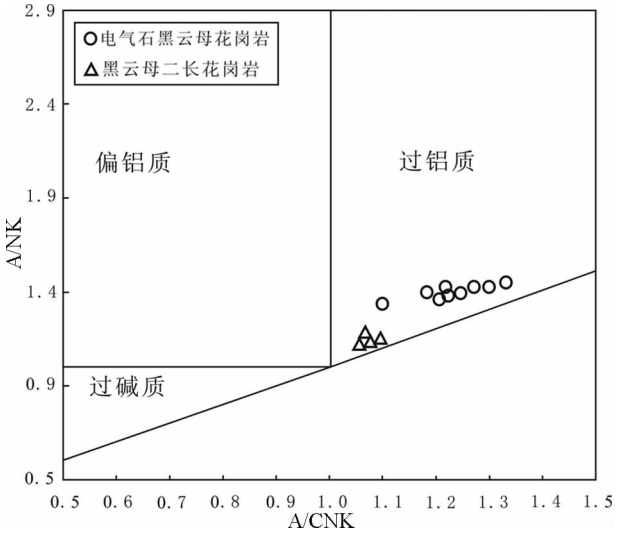


图 8　王仙岭电气石黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩的 A/CNK-A/NK 图解

Fig. 8　A/CNK vs. A/NK diagram of the Wangxianling tourmaline biotite granite and biotite monzonitic granite

表 2 王仙岭电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和黑云母二长花岗岩的主量元素分析数据(wt%)

Table 2 Major compositions of the Wangxianling tourmaline biotite granite, greisenization tourmaline granites and the biotite monzonitic granites (wt%)

样品号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	$Fe_2O_3^T$	FeO	MgO	MnO	P_2O_5	LOI	K_2O/Na_2O	Na_2O+K_2O	A/CNK
电气石黑云母花岗岩															
WXL-1	71.51	0.17	14.62	1.16	2.84	5.08	1.43	0.84	0.67	0.07	0.18	1.92	1.79	7.92	1.19
WXL-2	74.20	0.11	14.31	0.70	3.03	4.20	1.05	0.56	0.47	0.07	0.25	1.70	1.39	7.23	1.32
WXL-3	73.78	0.11	14.39	0.72	2.93	4.50	1.08	0.51	0.43	0.08	0.24	1.58	1.54	7.43	1.31
WXL-4	73.80	0.11	14.57	0.73	3.05	4.42	0.98	0.51	0.41	0.08	0.25	1.58	1.45	7.47	1.31
WXL-5	71.80	0.16	14.71	0.96	2.56	5.50	1.48	0.93	0.84	0.07	0.20	1.88	2.15	8.06	1.24
WXL-6	78.14	0.08	12.37	0.66	1.75	3.10	0.92	0.33	0.36	0.06	0.27	1.64	1.77	4.85	1.66
WXL-8	72.57	0.10	15.18	0.87	3.71	4.50	0.97	0.54	0.30	0.06	0.26	1.46	1.21	8.21	1.21
WXL-9	73.37	0.10	15.21	0.86	3.64	4.38	0.93	0.53	0.26	0.06	0.24	1.48	1.20	8.02	1.24
WXL-10	73.78	0.12	14.77	0.76	3.44	4.13	1.14	0.74	0.38	0.06	0.18	1.44	1.20	7.57	1.28
云英岩化电气石花岗岩															
WXL-11	76.70	0.09	14.68	0.69	0.25	2.71	0.96	0.23	0.28	0.04	0.13	2.68	10.84	2.96	3.19
WXL-12	69.07	0.07	19.66	0.94	0.54	2.78	1.53	0.37	0.45	0.05	0.35	3.30	5.15	3.32	3.51
WXL-13	72.47	0.05	18.00	0.80	0.34	2.56	0.98	0.19	0.29	0.04	0.19	3.30	7.53	2.90	3.76
WXL-14	72.68	0.07	17.09	1.08	0.37	2.69	1.26	0.20	0.36	0.05	0.41	2.94	7.27	3.06	3.12
WXL-19	76.12	0.10	14.60	0.57	0.32	3.57	0.99	0.18	0.25	0.05	0.30	2.22	11.16	3.89	2.69
WXL-20	74.75	0.10	15.78	0.41	0.37	4.02	1.08	0.22	0.28	0.03	0.29	2.34	10.86	4.39	2.77
WXL-21	76.88	0.09	14.67	0.36	0.25	3.79	0.99	0.21	0.24	0.05	0.26	2.56	15.16	4.04	2.84
WXL-22	75.98	0.10	15.08	0.48	0.40	3.32	1.08	0.20	0.27	0.05	0.28	2.14	8.30	3.72	2.94
WXL-23	76.94	0.08	14.71	0.40	0.28	3.75	0.83	0.19	0.22	0.03	0.27	1.20	13.39	4.03	2.80
黑云母二长花岗岩															
WXL-15	75.95	0.04	12.73	0.63	3.29	4.75	1.46	1.07	0.05	0.06	0.01	0.88	1.44	8.04	1.09
WXL-16	77.24	0.04	12.26	0.72	3.24	4.50	1.03	7.18	0.11	0.02	0.01	1.00	1.39	7.74	1.07
WXL-17	76.09	0.03	12.82	0.61	3.57	4.60	1.16	0.81	0.04	0.04	0.02	0.78	1.29	8.17	1.07
WXL-18	77.98	0.03	11.76	0.47	3.07	4.64	0.97	0.49	0.08	0.04	0.01	0.92	1.51	7.71	1.08

云英岩化电气石花岗岩(WXL-14)共测定了 13 个点,各点的年龄比较分散,从 230.5±3.0Ma 到 2440.1±18.3Ma 不等,未能获得较好的谐和图和加权平均年龄。其中 5 个点年龄测值分别为 231.2±4.9Ma (WXL-14-3)、230.5±3.0Ma (WXL-14-6)、230.7±1.0Ma (WXL-14-8)、230.8±2.1Ma (WXL-14-14)、230.6±2.2Ma (WXL-14-20),变化范围在 230.5±3.0Ma ~231.2±4.9Ma 左右,表明云英岩化电气石花岗岩年龄约为 231Ma,这也与未蚀变电气石黑云母花岗岩结晶年龄基本一致。其余锆石年龄从 434.4±8.0Ma 变化到 2440.1±18.3Ma,推测为岩浆形成过程中捕获的古老锆石。

4.2 主量、微量、稀土元素测试结果

王仙岭岩体电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和黑云母二长花岗岩主量元素成分见表 2。在火成岩的 SiO_2-AlK 分类命名图解(Cox, 1979)上,早期电气石黑云母花岗岩投在花岗岩区域;晚期黑云母二长花岗岩投在花岗岩区域的外缘右侧,属 SiO_2 含量较高的花岗岩(图 6),两期花岗岩均落入 Morrison(1980)所示高钾钙碱性岩石范围(图 7),电气石黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩的全碱(Na_2O+K_2O)平均含量分别为 7.41% 和 7.92%。电气石黑云母花岗岩 A/CNK 值为 1.19 ~1.66,黑云母二长花岗岩 A/CNK 值为 1.07 ~1.09,均属过铝质花岗岩(图 8)。

从早期电气石黑云母花岗岩到晚期黑云母二长花岗岩 SiO_2 含量升高,分别为 71.51% ~78.14%(平均 73.67%)和 75.95% ~77.88%(平均 76.82%);Al_2O_3 含量降低,分别为 12.37% ~15.21%(平均 14.46%)和 11.76% ~12.82%(平均 12.39%),电气石黑云母花岗岩 Al_2O_3 含量高可能与其含有电气石等铝硅酸盐有关。云英岩化电气石花岗岩 SiO_2 含量为 69.07% ~76.94%(平均 74.62%),Al_2O_3 含量为 14.60% ~19.66%(平均 16.03%)。Na_2O 含量很低,仅为 0.25% ~0.54%(平均 0.35%),可能是云英岩化蚀变导致的 Na 流失。

早期电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的稀土元素成分见表 3,球粒陨石标准化分布型式图见图 9。三者的稀土总量 ΣREE 分别是 41.28×10^{-6} ~ 128.6×10^{-6}(平均 70.42×10^{-6}),47.89×10^{-6} ~ 67.68×10^{-6}(平均 61.43×10^{-6}),194.6×10^{-6} ~ 268.1×10^{-6}(平均 238.9×10^{-6});其中 LREE 富集,分别为 35.35×10^{-6} ~ 116.7×10^{-6}(平均 62.50×10^{-6}),49.22×10^{-6} ~ 63.62×10^{-6}(平均 54.83×10^{-6}),141.6×10^{-6} ~ 181.0×10^{-6}(平均 165.7×10^{-6});HREE 亏损,分别 5.93×10^{-6} ~ 11.92×10^{-6}(平均 7.92×10^{-6}),5.31×10^{-6} ~ 7.79×10^{-6}

表 3　王仙岭电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和黑云母二长花岗岩的稀土元素分析数据($\times 10^{-6}$)

Table 3　REE compositions of the Wangxianling tourmaline biotite granites, greisenization tourmaline granites and the biotite monzonitic granites ($\times 10^{-6}$)

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	Eu/Eu*	La_N/Yb_N	LREE	HREE	ΣLREE/ΣHREE
电气石黑云母花岗岩																					
WXL-1	27.9	55.5	6.30	21.9	4.61	0.51	3.46	0.65	3.4	0.65	1.76	0.24	1.54	0.22	20.8	128.6	0.37	13	116.7	11.92	9.79
WXL-2	11.8	21.8	2.75	9.62	2.14	0.19	1.87	0.38	1.94	0.34	0.95	0.13	0.92	0.13	11.6	54.96	0.28	9.2	48.30	6.66	7.25
WXL-3	11.5	23.8	2.75	9.55	2.16	0.18	1.97	0.40	2.00	0.36	0.91	0.14	0.86	0.13	11.6	56.71	0.26	9.59	49.94	6.77	7.38
WXL-4	11.2	22.3	2.62	9.02	2.04	0.17	1.73	0.36	2.06	0.33	0.99	0.15	0.85	0.14	11.8	53.96	0.27	9.45	47.35	6.61	7.16
WXL-5	24.8	49.90	5.59	19.5	4.10	0.47	3.2	0.59	3.21	0.51	1.47	0.19	1.31	0.19	16.4	115.0	0.38	13.58	104.4	10.67	9.78
WXL-6	8.23	16.10	2.00	7.02	1.85	0.15	1.66	0.35	1.82	0.32	0.82	0.10	0.75	0.11	11	41.28	0.26	7.87	35.35	5.93	5.96
WXL-8	11.6	22.10	2.78	9.25	2.11	0.2	1.88	0.4	2.03	0.37	1.03	0.14	0.95	0.13	12.9	54.97	0.3	8.76	48.04	6.93	6.93
WXL-9	11.2	22.0	2.58	8.98	2.19	0.17	1.81	0.36	1.89	0.33	1.00	0.13	0.89	0.11	11.5	53.64	0.25	9.03	47.12	6.52	7.23
WXL-10	15.3	30.8	3.60	12.5	2.92	0.22	2.55	0.54	2.76	0.47	1.30	0.19	1.25	0.17	16.4	74.57	0.24	8.78			
云英岩化电气石花岗岩																					
WXL-11	11.5	23.5	2.70	9.22	2.14	0.16	1.62	0.31	1.73	0.3	0.76	0.11	0.76	0.09	9.37	54.9	0.25	10.85	49.22	5.68	8.67
WXL-12	14.1	29.6	3.35	11.6	2.68	0.23	2.09	0.44	2.42	0.4	1.1	0.15	0.93	0.12	12.9	69.21	0.29	10.88	61.56	7.65	8.05
WXL-13	14.7	31.4	3.38	11.4	2.55	0.19	1.84	0.38	1.79	0.3	0.81	0.12	0.72	0.1	9.84	69.68	0.26	14.64	63.62	6.06	10.5
WXL-14	13.4	28.1	3.17	10.8	2.42	0.18	2.13	0.45	2.39	0.42	1.16	0.15	0.96	0.13	13.8	65.86	0.24	10.01	58.07	7.79	7.45
WXL-19	13.1	25.3	3.12	10.8	2.53	0.22	2.08	0.42	2.23	0.38	1.06	0.15	0.96	0.14	13.7	62.49	0.28	9.79	55.07	7.42	7.42
WXL-20	12.4	25	2.78	9.55	2.15	0.17	1.84	0.36	1.86	0.31	0.82	0.11	0.7	0.1	10.1	58.15	0.25	12.71	52.05	6.10	8.53
WXL-21	12.5	24.6	2.92	9.99	2.18	0.18	1.78	0.38	1.97	0.33	0.86	0.13	0.89	0.12	11.3	58.83	0.27	10.07	52.37	6.46	8.11
WXL-22	13.7	28.9	3.13	10.6	2.38	0.21	2.06	0.41	2.1	0.38	0.93	0.13	0.83	0.12	12.1	65.88	0.28	11.84	58.92	6.96	8.47
WXL-23	10.3	19.6	2.41	8.26	1.83	0.18	1.48	0.31	1.66	0.27	0.71	0.1	0.69	0.09	8.98	47.89	0.32	10.71	42.58	5.31	8.02
黑云母二长花岗岩																					
WXL-15	29.7	60.7	8.50	32.6	10	0.07	10.8	2.33	14.9	3.24	9.69	1.49	9.2	1.36	102	194.6	0.02	2.32	141.6	53.01	2.67
WXL-16	34.3	71.7	10.6	43.3	14.9	0.12	17.3	3.7	23.9	4.88	14.6	2.14	14.8	2.06	161	258.3	0.023	1.66	174.9	83.38	2.10
WXL-17	34.5	74.7	11.1	44.6	16	0.09	18.4	3.86	24.7	5.12	15.1	2.27	15.4	2.23	189	268.1	0.016	1.61	181.0	87.08	2.08
WXL-18	32.7	71.4	9.65	38.2	13.2	0.07	15.3	3.12	19.9	4.16	12	1.83	11.5	1.63	154	234.7	0.015	2.04	165.2	69.44	2.38

注:其中 $Eu/Eu^* = Eu_N/(Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$

表 4　王仙岭电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和黑云母二长花岗岩的微量元素分析数据（$\times 10^{-6}$）

Table 4　Trace element compositions of the Wangxianling tourmaline biotite granites, greisenization tourmaline granites and the biotite monzonitic granites ($\times 10^{-6}$)

样品号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Cs	Ba	Ta	Hf	Tl	Pb	Th	U	Rb/Sr	Rb/Nb	Nb/Ta
电气石黑云母花岗岩																									
WXL-1	126	37.8	4.05	14.5	6.26	2.78	2.57	15.9	61.1	20.8	609	50.9	85.4	21.6	155	226	6.19	3.1	3.83	51.3	21	16.7	11.96	28.19	3.49
WXL-2	326	12.3	3.73	6.45	2.84	1.05	1.07	13.3	44.1	23.8	729	20.7	41.5	37.2	283	45.9	11.7	1.75	4.09	26.7	8.77	22.5	35.22	19.6	3.18
WXL-3	357	27.2	4.3	5.64	2.34	1.05	0.94	15.1	39.3	24.8	803	14.3	46.3	41.4	297	41.1	14	1.93	4.5	29.1	8.85	22	56.15	19.4	2.96
WXL-4	305	20.6	4.04	5.4	2.31	0.95	0.77	15.3	56.1	25	748	14.3	44.4	40.5	216	37.6	13	2.07	4.74	70.1	8.84	21.6	52.31	18.47	3.12
WXL-5	122	18	4.27	12.5	6.4	2.06	2.22	7.18	46.9	21	656	41.8	83.5	25.2	127	236	6.44	3.07	4.07	52.9	20.4	25.6	15.69	26.03	3.91
WXL-6	182	65.3	2.35	4.79	1.81	0.7	0.62	6.48	47.2	21	633	7.91	31.8	26.5	245	27.9	10.7	1.41	3.62	45	6.39	17.6	80.03	23.89	2.48
WXL-8	288	14.1	2.83	4.92	2.11	0.86	0.89	5.64	33.9	22.1	592	33.1	46.5	29	194	56.6	8.01	2	3.74	34.4	8.67	18.5	17.89	20.41	3.62
WXL-9	340	11.5	3.38	5.33	2.53	0.83	0.89	6.31	32.7	25.5	650	24.9	40.9	39	162	34.1	10.4	1.76	3.54	27.2	8.56	21.1	26.10	16.67	3.75
WXL-10	437	5.69	4.49	7.77	3.21	1.23	1.11	8.13	41.2	25.9	628	31.6	53.3	40.5	303	59.1	8.68	2.3	3.53	30.1	11.9	26.1	19.87	15.51	4.67
云英岩化电气石花岗岩																									
WXL-11	1322	6.13	1.62	4.73	1.91	0.94	0.62	6.34	34.9	16.8	453	21.4	41.8	22.1	612	24	14.8	1.83	5.07	28.7	8.77	26	21.17	20.5	1.49
WXL-12	1673	7.62	2.15	8.09	3.31	1.96	2.21	2.8	76.3	21.4	395	36	49.5	4.37	661	31.9	5.86	2.38	4.55	31.1	9.85	22.6	10.97	90.39	0.75
WXL-13	1992	6.67	1.25	4.1	2.14	1.06	0.73	1.73	53.8	16.4	391	18.9	46	1.29	639	26.5	1	2.26	4.39	24.1	10.3	22.8	20.69	303.1	1.29
WXL-14	1348	6.62	3.04	5.11	2.51	1.49	1.2	2.51	67	19.7	404	27.5	52.5	6.5	648	28.3	6.17	2.31	4.54	24	9.37	26.6	14.69	62.15	1.05
WXL-19	316	4.57	3.22	5.36	4	0.94	1.24	16.5	26.8	19.5	668	18.3	47.4	22.3	427	47.2	7.78	1.99	4.24	6.25	9.22	21.6	36.50	29.96	2.87
WXL-20	343	5.21	1.65	4.84	5.98	1.01	1.61	8.22	27.4	19.5	734	10.3	51.9	25.4	465	38.9	7.82	2.13	4.61	14.3	9.33	24.9	71.26	28.9	3.25
WXL-21	799	8.31	3.17	4.6	5.2	0.93	1.76	8.86	21.4	21.9	659	15.7	45.2	29.6	337	64.8	9.73	1.97	4.19	18.1	9.01	20.3	41.97	22.26	3.04
WXL-22	399	3.05	1.92	4.62	1.95	0.96	0.69	13.3	43.5	18.4	573	13	48.4	21	567	31.9	8.16	2.12	3.74	7.47	10.2	29.2	44.08	27.29	2.57
WXL-23	349	4.47	1.25	4.38	1.89	0.81	0.44	7.11	25.9	19.2	675	11.4	42	27.8	451	23.7	9.7	1.81	4.35	10.7	7.62	17.4	59.21	24.28	2.87
黑云母二长花岗岩																									
WXL-15	380	5.5	3.3	0.71	1.38	0.34	0.43	1.47	30.8	26.7	995	4.34	97.2	36.4	76.1	6.43	10.8	5.97	4.84	40.6	27.9	27.4	229.3	27.34	3.37
WXL-16	48.7	5.09	3.85	1.57	1.74	0.58	1.15	2.33	13.3	24.6	675	10.6	85	34.5	23.7	22.9	8.79	5.98	3.44	37	38.2	32.2	63.68	19.57	3.92
WXL-17	263	32.9	4.65	0.57	7.58	0.39	3.09	2.12	28	27.8	916	5.99	98.2	43.9	58.1	6.52	12.5	6.84	4.55	69.2	36.6	32.4	152.9	20.87	3.51
WXL-18	17.4	14.3	2.77	1.46	1.87	0.47	0.49	3.02	73.1	22.6	632	7.25	86.4	33.6	20.4	16	8.93	5.7	3.57	55	31.2	22.2	87.17	18.81	3.76

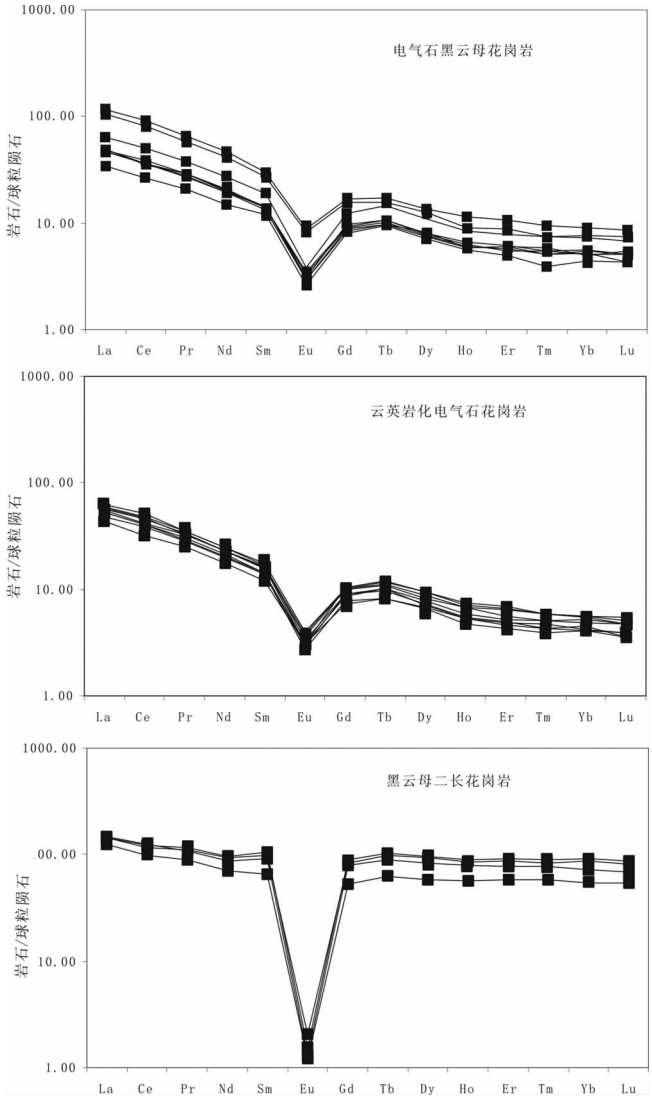


图 9 王仙岭电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和黑云母二长花岗岩的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns of the Wangxianling tourmaline biotite granites, greisenization tourmaline granites and the biotite monzonitic granites (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

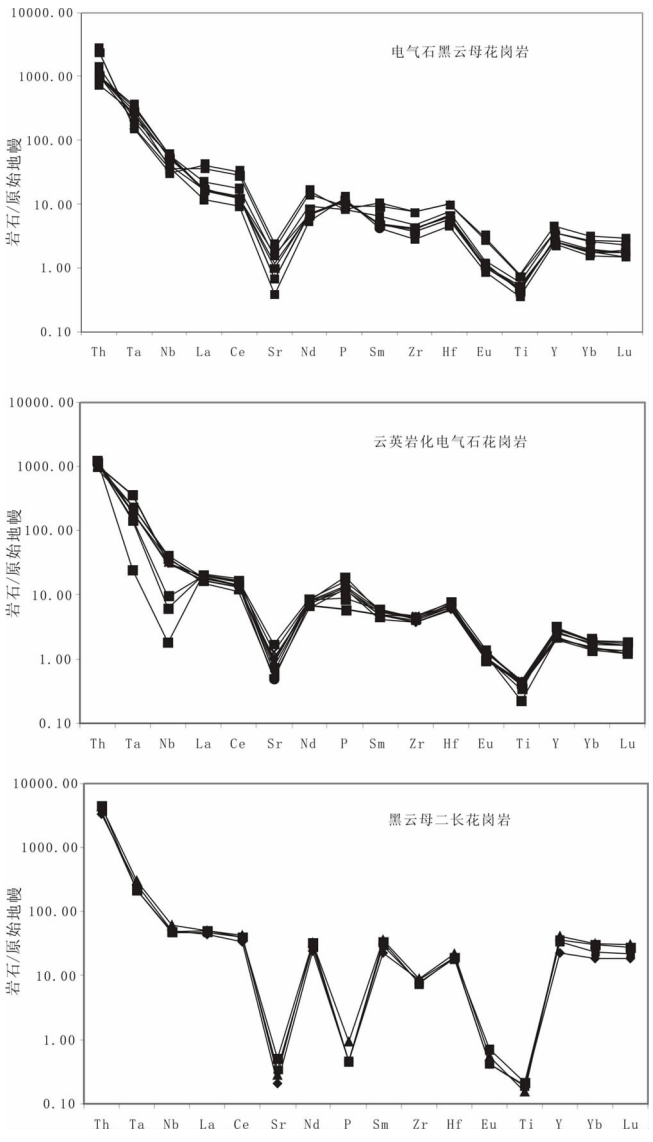


图 10 王仙岭电石气黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和黑云母二长花岗岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 10 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of the Wangxianling tourmaline biotite granites, greisenization tourmaline granites and the biotite monzonitic granites (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

(平均 6.60×10^{-6}),53.01×10^{-6} ~ 87.08×10^{-6}(平均 73.23×10^{-6})。早期电石气黑云母花岗岩和云英岩化电气石花岗岩轻重稀土分馏明显,$\sum$LREE/$\sum$HREE 比值分别为 5.96 ~ 9.79(平均 7.62),7.42 ~ 10.50(平均 8.36),而黑云母二长花岗岩 $\sum$LREE/$\sum$HREE 比值为 2.08 ~ 2.67(平均 2.31)。$(La/Yb)_N$ 分别是 7.87 ~ 13.58(平均 9.92),9.79 ~ 14.64(平均 11.28),1.61 ~ 2.32(平均 1.91)。其中晚期黑云母二长花岗岩的稀土总含量相比较高,而早期电气石黑云母花岗岩相比轻重稀土分馏明显。三者均具 Eu 负异常,其中晚期黑云母二长花岗岩的 Eu/Eu^* 最低,为 0.01 ~ 0.02,早期电气石黑云母花岗岩和云英岩化电气石花岗岩的 Eu/Eu^* 值分别为 0.24 ~ 0.38,0.24 ~ 0.32。

早期电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的微量元素成分见表 4,原始地幔标准化微量元素蛛网图见图 10。早期的电气石黑云母花岗岩和云英岩化电气石花岗岩均表现出明显的 Sr 和 Ti 负异常和轻微的 Zr 负异常,晚期黑云二长花岗岩显示出 Sr、P、Zr、Ti 的负异常。其中 Sr 亏损指示斜长石分离结晶;P 亏损指示磷灰石的分离结晶; Ti 亏损指示钛铁矿的分离结晶, 也暗示岩浆

表 5 王仙岭岩体早期电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和黑云母二长花岗岩的锆石 Hf 同位素分析结果

Table 5 Zircon Hf isotopic compositions of the Wangxianling tourmaline biotite granites, greisenization tourmaline granites and biotite monzonitic granites

测点号	t(Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	$2\sigma_m$	$^{176}Hf/^{177}Hf_i$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	t_{DM}(Ma)	t_{DM2}(Ma)	$f_{Lu/Hf}$
WXL-4(电气石黑云母花岗岩)										
WXL4-1	232	0.137385	0.001928	0.282619	0.000026	0.282611	-0.61	918	1298	-0.94
WXL4-3	239	0.113062	0.001581	0.282469	0.000019	0.282462	-5.73	1124	1626	-0.95
WXL4-4	237	0.187474	0.002576	0.282600	0.000027	0.282588	-1.29	963	1346	-0.92
WXL4-8	236	0.173629	0.002374	0.282574	0.000020	0.282563	-2.21	996	1403	-0.93
WXL4-15	233	0.177896	0.002256	0.282541	0.000024	0.282531	-3.40	1040	1475	-0.93
WXL-14 (云英岩化电气石花岗岩)										
WXL14-2	453	0.137341	0.002004	0.282644	0.000025	0.282627	4.87	883	1122	-0.94
WXL14-3	231	0.115013	0.001621	0.282411	0.000018	0.282404	-7.92	1207	1758	-0.95
WXL14-6	231	0.165997	0.002182	0.282768	0.000026	0.282759	4.61	707	967	-0.93
WXL14-7	434	0.175181	0.002406	0.282525	0.000024	0.282505	0.13	1068	1407	-0.93
WXL14-8	231	0.158493	0.002122	0.282579	0.000020	0.282570	-2.09	981	1391	-0.94
WXL14-9	903	0.006785	0.000110	0.281954	0.000018	0.281952	-9.03	1781	2335	-1.00
WXL14-11	858	0.055406	0.000730	0.282060	0.000016	0.282048	-6.66	1665	2153	-0.98
WXL14-14	231	0.123478	0.001888	0.282563	0.000016	0.282555	-2.61	998	1424	-0.94
WXL14-15	450	0.061741	0.000935	0.282353	0.000015	0.282345	-5.19	1266	1752	-0.97
WXL14-17	1011	0.120583	0.001629	0.282265	0.000016	0.282234	3.34	1415	1647	-0.95
WXL14-18	2440	0.059523	0.000804	0.281016	0.000015	0.280979	-8.71	3090	3482	-0.98
WXL14-20	231	0.166607	0.002343	0.282501	0.000015	0.282491	-4.87	1101	1566	-0.93
WXL-16(黑云母二长花岗岩)										
WXL-16-2	159	0.056376	0.002033	0.282378	0.000020	0.282372	-10.66	1269	1875	-0.94
WXL-16-4	155	0.032758	0.001244	0.282439	0.000023	0.282436	-8.49	1155	1736	-0.96
WXL-16-7	155	0.140164	0.005044	0.282433	0.000028	0.282418	-9.10	1295	1774	-0.85
WXL-16-8	157	0.084101	0.002961	0.282488	0.000021	0.282479	-6.91	1139	1638	-0.91
WXL-16-9	154	0.025353	0.001013	0.282418	0.000028	0.282415	-9.24	1179	1783	-0.97
WXL-16-10	157	0.066319	0.002233	0.282480	0.000024	0.282473	-7.12	1128	1651	-0.93
WXL-16-11	157	0.038059	0.001248	0.282411	0.000030	0.282407	-9.47	1196	1799	-0.96
WXL-16-15	154	0.087039	0.002768	0.282533	0.000029	0.282525	-5.35	1066	1538	-0.92
WXL-16-18	154	0.014363	0.000591	0.282433	0.000022	0.282431	-8.68	1144	1746	-0.98
WXL-16-19	156	0.052882	0.001833	0.282458	0.000027	0.282453	-7.87	1147	1697	-0.94

注: $\varepsilon_{Hf}(0)=[(^{176}Hf/^{177}Hf)_S/(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0}-1]\times 10,000$; $\varepsilon_{Hf}(t)=\{[(^{176}Hf/^{177}Hf)_S-(^{176}Lu/^{177}Hf)_S\times(e^{\lambda t}-1)]/[(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0}-(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}\times(e^{\lambda t}-1)]-1\}\times 10,000$; $t_{Hf1}=1/\lambda\times\ln\{1+[(^{176}Hf/^{177}Hf)_S-(^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM}]/[(^{176}Lu/^{177}Hf)_S-(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM}]\}$; $t_{Hf2}=t_{Hf1}-(t_{Hf1}-t)[(f_{CC}-f_S)/(f_{CC}-f_{DM})]$ (f_{CC}, f_S, f_{DM} 分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的 $f_{Lu/Hf}$); $f_{Lu/Hf}=(^{176}Lu/^{177}Hf)_S/(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}-1$; $(^{176}Hf/^{177}Hf)_i=(^{176}Hf/^{177}Hf)_S-(^{176}Lu/^{177}Hf)_S\times(e^{\lambda t}-1)$, 其中: $(^{176}Lu/^{177}Hf)_S$ 和 $(^{176}Hf/^{177}Hf)_S$ 为样品测定值, $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0}=0.282772$, $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}=0.0332$; $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM,t}=0.28325$, $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM}=0.0384$; $\lambda=1.867\times10^{-11}a^{-1}$

物质来源于地壳,因为 Ti 不易进入熔体而残留在源区。

反映岩石分异演化的元素比值(Rb/Sr、Rb/Nb、Nb/Ta)由早期电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩到黑云母二长花岗岩依次为: Rb/Sr = 11.96 ~ 80.03(平均 35.02), 10.97 ~ 71.26(平均 35.61), 63.68 ~ 229.3(平均 133.3); Rb/Nb = 15.51 ~ 28.19(平均 20.91), 20.50 ~ 303.10(平均 67.65), 18.81 ~ 27.34(平均 21.64); Nb/Ta = 2.48 ~ 4.67(平均 3.46), 0.75 ~ 3.25(平均 2.13), 3.57 ~ 3.92(平均 3.64)。

4.3 锆石 Hf 同位素分析结果

早期电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的锆石 Hf 同位素分析结果见表 5, Hf 同位素演化图解见图 11。不考虑云英岩化电气石花岗岩(WXL-14)中继承老锆石(点 WXL-14-2、7、9、11、15、17、18), 早期电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 初始比值分别为 0.282462 ~ 0.282611、0.282404 ~ 0.282759 和 0.282372 ~ 0.282525。早期电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值分别为 -5.73 ~ -0.61、-7.92 ~ +4.61、-10.66 ~ -5.35; 两阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})分别为 1626 ~ 1298Ma、1758 ~ 967Ma、1875 ~ 1538Ma。

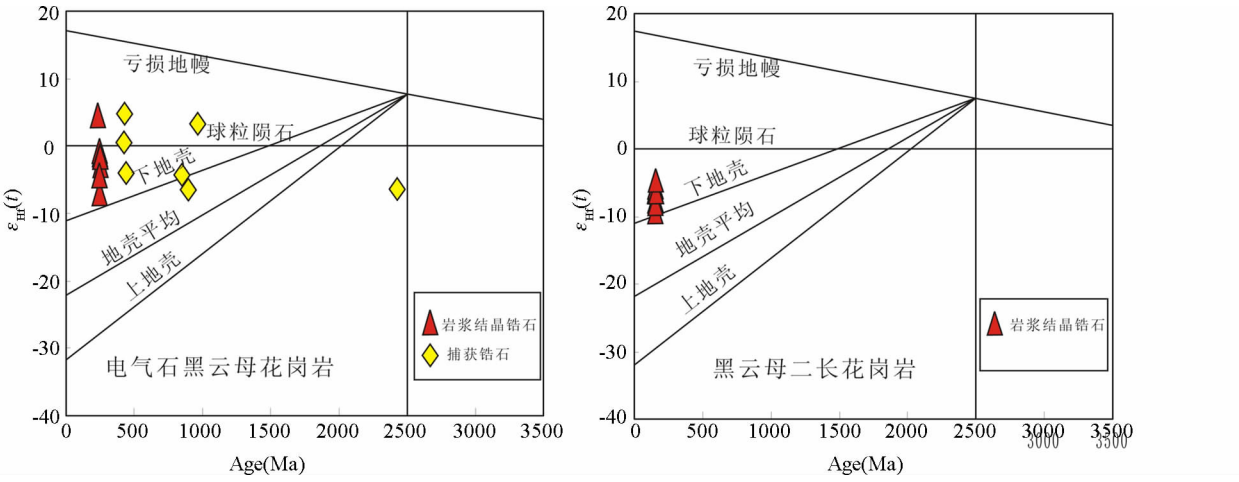


图 11　王仙岭电气石黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩的 Hf 同位素演化图解

Fig. 11　Hf isotopic diagram of the Wangxianling tourmaline biotite granites and the biotite monzonitic granites

5　讨论

5.1　王仙岭岩体的成岩期次划分

柏道远等(2006)在对王仙岭岩体进行研究的时候将岩体分为边部的细中粒斑状黑云母二长花岗岩和中心的中粗粒电气石二云母二长花岗岩,而章荣清等(2010)认为王仙岭岩体中心相为粗粒二云母花岗岩,边缘相为电气石(黑云母)花岗岩。本文在对王仙岭岩体进行野外工作的基础上,认为王仙岭岩体中心相主要为中粗粒电石气黑云母花岗岩,该带岩石部分发生蚀变,主要为云英岩化和硅化蚀变;边缘相为细中粒电气石黑云母花岗岩,有燕山期的黑云母二长花岗岩株侵入边缘相中。

LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 测年获得电气石黑云母花岗岩年龄为 235.0 ± 1.3Ma,云英岩化电气石花岗岩的年龄约为 231Ma,二者应为同期产物。从主量元素上来看,电气石黑云母花岗岩和云英岩化电气石花岗岩的 SiO_2、TiO_2、FeO、P_2O_5 等的含量相似,仅有 Na_2O 含量和电气石黑云母花岗岩相差较大,可能是蚀变过程导致 Na 流失。微量元素不易受后期次生变化的干扰,从微量和稀土元素的分析结果看,二者的稀土元素配分曲线(图 8)和微量元素蛛网图(图 9)一致,表明中心电气石黑云母花岗岩和云英岩化花岗岩为同期同源花岗岩,均属王仙岭岩体早期产物。

黑云母二长花岗岩主要分布在岩体边部,呈细粒结构,相对于早期电石气黑云母花岗岩,黑云母二长花岗岩主量元素 SiO_2 略高,Al_2O_3、TiO_2、FeO、P_2O_5 等的含量降低,从微量和稀土元素的分析结果看,黑云母二长花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(图 9)和微量元素原始地幔标准化分布型式图与电气石黑云母花岗岩的分布截然不同(图 10),黑云母二长花岗岩的 Hf 同位素分布也与早期花岗岩不同(图 11)。表明黑云母二长花岗岩与早期的电气石黑云母花岗岩和云英岩化花岗岩为不同时期的产物。

5.2　王仙岭岩体年代学特征

20 世纪 80 年代,湘南地质队用白云母 K-Ar 法测得王仙岭花岗岩的年龄为 206.4 ~ 222.5Ma,用锆石 U-Th-Pb 测得的年龄为 192Ma(湘南地质队,1983)。Wei *et al.* (2007)采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年得到王仙岭岩体西部补体花岗岩的年龄为 212 ± 4Ma。已有的年龄结果均表明王仙岭岩体为印支期的产物,本次采用 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 定年测得王仙岭岩体的电气石黑云母花岗岩和黑云母二长花岗岩成岩年龄分别为 235 ± 1.3Ma 和 155.9 ± 1.0Ma。上述年龄结果显示王仙岭岩体形成于印支期和燕山期,是一个复式岩体,属于两次岩浆活动的产物。

荷花坪锡多金属矿位于王仙岭岩体东南接触带,主要由含锡矽卡岩和锡石-硫化物两类矿石组成。蔡明海等(2006)对早期形成的矽卡岩矿石中的 5 个辉钼矿样品进行 Re-Os 年龄测定得到成矿年龄为 224.0 ± 1.9Ma,表明荷花坪锡矿的形成可能与王仙岭岩体早期电气石黑云母花岗岩有关。

晚期黑云母二长花岗岩的是燕山期的产物,其形成时间与周围的千里山、骑田岭花岗岩体及其相关矿床一致(毛景文等,1995,2004;刘义茂等,1997, 2002;赵葵东等, 2006;Jiang *et al.*, 2006, 2009; Yuan *et al.*, 2007, 2008, 2011),表明三者可能是同期岩浆活动的产物。

5.3　王仙岭岩体花岗岩的源区及演化特征

王仙岭岩体电气石黑云母花岗岩铝饱和指数(A/CNK)均大于 1.1,为强过铝质,并且含铝硅酸盐矿物电气石,应属于典型的 S 型花岗岩(Sylvester, 1998),其源区物质可能主要为变质沉积岩(Chappel and White, 1974)。

Rb/Sr 和 Rb/Nb 比值可以反映岩浆的物质来源,早期电气石黑云母花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的 Rb/Sr 比值

分别为 11.96 ~ 80.03 和 63.68 ~ 229.3,Rb/Nb 比值为 15.51 ~ 28.19 和 18.81 ~ 27.34,明显高于高山等(1999)所给出的中国东部上地壳平均值 0.31 和 6.8。主量元素 CaO/Na_2O 的值可以指示强过铝质花岗岩的原岩物质来源(Sylvester, 1998),早期电气石黑云母花岗岩的 CaO/Na_2O 的值较低(<0.3),说明其主要是泥质岩熔融产生的。

早期电气石黑云母花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的铕负异常较强,Eu/Eu^* 分别为 0.24 ~ 0.38 和 0.01 ~ 0.02,暗示存在斜长石的分离结晶。早期电气石黑云母花岗岩微量元素不相容元素原始地幔标准化蛛网图所显示的 Sr、Ti 的负异常表明斜长石和钛铁矿的分离结晶;而晚期黑云母二长花岗岩微量元素蛛网图 Sr、P、Zr、Ti 的负异常指示了斜长石、磷灰石、钛铁矿的分离结晶。

锆石 Hf 同位素分析能更好的鉴别花岗岩浆的物质来源(Griffin *et al.*, 2002;吴福元等,2007)。从 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值来看,早期电气石黑云母花岗岩(包括电气石黑云母花岗岩和云英岩化电气石花岗岩)的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(-9.03 ~ +4.87),其中 WXL14-2、WXL14-7 和 WXL14-17 的年龄分别为 453Ma、434Ma 和 1011Ma,推断为捕获的幔源老锆石;WXL14-6 与成岩年龄一致,可能成岩过程有少量幔源物质的参与。晚期黑云母二长花岗岩(-10.66 ~ -5.35)。

早期电气石黑云母花岗岩、云英岩化电气石花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩的两阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})分别为 1626 ~ 1298Ma、1758 ~ 967Ma、1875 ~ 1538Ma,均早于华夏地块变质基底岩石的 Nd 模式年龄(2.2 ~ 1.8Ga,陈江峰等,1999),暗示源岩均来自于古中元古代古老地壳物质的重熔。

5.4 华南早中生代地球动力学背景与花岗岩成因关系的探讨

在印支运动主碰撞期 258 ~ 243Ma(Carter *et al.*, 2001),华南处于一个相对挤压的构造环境,华南印支期存在陆壳叠置加厚得到了大多数学者的认同(周新民,2003;孙涛等,2003;王岳军等,2002,2005; Zhou *et al.*, 2006),而郭锋等(1997)获得的湖南道县辉长岩包体 224 ± 24Ma 的等时线年龄,虎子岩基性岩中三个代表性的捕虏体的 U-Pb 年龄是 220Ma (Dai *et al.*, 2008); 赵振华等(1998)获得虎子岩基性岩 204.3 ± 4.1Ma 的 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄均暗示了华南印支期存在拉张的构造环境。王岳军等(2002,2005)研究认为区内该期花岗岩是陆壳叠置加厚作用的结果;孙涛等(2003)通过研究认为 228 ~ 225Ma 南岭中段印支期强过铝质花岗岩形成于印支运动主碰撞期之后伸展的构造环境,Zhou *et al.* (2006)更进一步将华南印支期花岗岩分为印支早期花岗岩(251 ~ 234Ma)和印支晚期花岗岩(234 ~ 205Ma),并认为印支早期花岗岩是同碰撞花岗岩,主要形成于挤压的构造环境,而印支晚期花岗岩为后碰撞花岗岩,主要形成于拉张环境。

王仙岭岩体的早期印支期花岗岩年龄为 235 ~ 231Ma,形成于同碰撞挤压环境向后碰撞拉张环境转换的时期,不考虑捕获老锆石,其余锆石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -7.92 ~ -0.61,明显高于印支期壳源大容山-十万大山花岗岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(-11 ~ -9,祁昌实等,2007)和王仙岭晚期黑云母二长花岗岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(-10.66 ~ -5.35),说明王仙岭印支期电气石黑云母花岗岩的源区物质具有高 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值的特点。

晚期黑云母二长花岗岩的年龄为 155.9 ± 1.0Ma,和与其紧邻的千里山、骑田岭的成岩时间年龄(152 ~ 163Ma)(毛景文等,1995,2004;刘义茂等,1997, 2002;赵葵东等, 2006; Jiang *et al.*, 2006, 2009; Yuan *et al.*, 2011)一致,同属燕山早期花岗岩,且其位于 Gilder *et al.* (1996)提出的高 ε_{Nd}、低 t_{DM} 花岗岩带(称十-杭带)上。洪大卫等(2002)认为该高 ε_{Nd} 低 t_{DM} 花岗岩带可能是地幔物质上涌加入地壳的一条重要通道,导致花岗岩的 ε_{Nd} 值升高和 t_{DM} 值降低。陈培荣等(2002)认为南岭燕山早期花岗岩形成于后造山的大陆裂解的地球动力学背景。周新民(2003)指出华南燕山期花岗岩都形成于伸展的构造环境,强调确实存在铁镁质岩浆的底侵作用。蒋少涌等(2008)推测出十杭带湘南-桂北段(千里山岩体和骑田岭岩体)中生代(163 ~ 152Ma)花岗质岩体为一条 A 型花岗岩带,该带的形成过程有少量幔源物质的参与,其形成应该与拉张的地球动力学背景有关。

总之,王仙岭花岗岩是一个印支期和燕山期的复合岩体。早期电气石黑云母花岗岩形成于碰撞挤压引起的陆壳叠置变形加厚岩石圈出现拉张伸展的间隙;而燕山期黑云母二长花岗岩在同一地壳薄弱地段侵位,可能为大陆边缘弧后伸展环境(Mao *et al.*, 2011; 毛景文等,2011)。

6 结论

(1)王仙岭岩体的电气石黑云母花岗岩的形成时代为 235.0 ± 1.3Ma、黑云母二长花岗岩为 155.9 ± 1.0Ma,说明王仙岭岩体是一个印支期和燕山期的复式岩体。

(2)早期电气石黑云母花岗岩和晚期黑云母二长花岗岩均主要源于古中元古代地壳物质重熔,形成过程中都经历了结晶分异作用。

(3)印支期电气石黑云母花岗岩的源区具有高 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值的特点,且在部分熔融成岩过程中有少量幔源物质的参与,并在上升侵位过程中捕获了大量幔源锆石,导致其锆石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值偏高,且有部分正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值的存在。

(4)推测印支期电气石黑云母花岗岩形成于碰撞挤压作用的间歇期岩石圈拉张伸展环境下,而燕山期黑云母二长花岗岩形成于大陆边缘弧后伸展环境。

致谢 两位审稿人对本文提出了富有建设性的意见和批评;成文过程中得到了汪欢同学的帮助;在此一并表示感谢。

References

Bai DY, Chen JC, Ma TQ and Wang XH. 2006. Geochemical

characteristics of Wangxianling granitic pluton and its constrain on Late Indosinian tectonic setting of south Hunan. Geochimica, 35(2): 113 - 125(in Chinese with English abstract)

Cai MH, Chen KX, Qu WJ, Liu GQ, Fu JM and Yin JP. 2006. Geological characteristics and Re-Os dating of molybdenites in Hehuaping tin-polymetallic deposit, South Hunan Province. Mineral Deposits, 25(3): 263 - 268 (in Chinese with English abstract)

Carter A, Roques D, Bristow C and Kinny P. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam. Geology, 29: 211 - 214

Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geol., 8: 173 - 174

Chen JF, Guo XS, Tang JF and Zhou TX. 1999. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeasten China. Journal of Nanjing University (Natural Science), 35(6): 649 - 658(in Chinese with English abstract)

Chen PR, Hua RM, Zhang BT, Lu JJ and Fan CF. 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in Nanling region: Petrological constraints and geodynamic settings. Science in China (Series D), 32(4): 279 - 289(in Chinese)

Chen YC, Pei RF, Zhang HL *et al*. 1989. The Geology of Non-ferrous and Rare Metal Deposits Related to Mesozoic Granitoids in Nanling Region. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 474(in Chinese with English abstract)

Cox KG. 1979. The Interpretation of Igneous Rocks. Allen and Unwin, 1 - 450

Dai BZ, Jiang SY, Jiang YH, Zhao KD and Liu DY. 2008. Geochronology, geochemistry and Hf-Sr-Nd isotopic compositions of Huziyan mafic xenoliths, southern Hunan Province, South China: Petrogenesis and implications for lower crust evolution. Lithos, 102(1 - 2): 65 - 87

Elhlou S, Belousova E, Griffin WL *et al*. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. Geochim. Cosmochim. Acta, (Suppl.), A158

Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW, Zhao ZD and Hartmut K. 1999. Structure and compositon of the continental curst in East China. Science in China (Series D), 29(3): 204 - 213 (in Chinese)

Gilder SA, Gill J, Coe RS *et al*. 1996. Isotopic and paleomagmatic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China. Journal of Geophysics Research, 101(B7): 13137 - 16154

Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson SE, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon chemistry and magma genesis, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithos, 61: 237 - 269

Guo F, Fan WM, Lin G and Lin YX. 1997. Geochronology of gabbro inclusions in Daoxian, Hunan Province and its genetic analysis. Chinese Science Bulletin, 42(15): 1661 - 1664 (in Chinese)

Hong DW, Xie XL and Zhang JS. 2002. Geological significance of the Hangzhou-Zhuguangshan-Huashan high-ε_{Nd} granite belt. Geological Bulletin of China, 21(6): 348 - 354 (in Chinese with English abstract)

Hua RM and Mao JW. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in East China. Mineral Deposits, 18(4): 300 - 307(in Chinese with English abstract)

Hua RM, Chen PR, Zhang WL, Liu XD, Lu JJ, Lin JF, Yao JM, Qi HW, Zhang ZS and Gu SY. 2003. Metallogenic systems related to Mesozoic and Cenozoic granitoids in South China. Science in China (Series D), 33(4): 335 - 343(in Chinese)

Hou KJ. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2595 - 2604 (in Chinese with English abstract)

Hou KJ, Li YH and Tian YR. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. Mineral Deposits, 28(4): 481 - 492(in Chinese with English abstract)

Hou KJ, Li YH and Xie GQ. 2010. LA-MC-ICP-MS zircon Hf isotope analytical methods and its geological applications. In: Li YH *et al*. (eds.). A New Method for Isotope Analysis and Dating. Beijing: Geological Publishing House, 40 - 48 (in Chinese with English abstract)

Jiang SY, Zhao KD, Jiang YH and Dai BZ. 2008. Characteristics and genesis of Mesozoic A-type granites and aAssociated mineral deposits in the southern Hunan and northern Guangxi provinces along the Shi-Hang Belt, South China. Geological Journal of China Universities, 14(4): 496 - 509(in Chinese with English abstract)

Jiang YH, Jiang SY, Zhao KD and Ling HF. 2006. Petrogenesis of Late Jurassic Qianlishan granites and mafic dikes, Southeast China: Implications for a back-arc extension setting. Geological Magazine, 143(4): 457 - 474

Jiang YH, Jiang SY, Dai BZ, Liao SY, Zhao KD and Ling HF. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China: Implications for a continental arc to rifting. Lithos, 107(3 - 4): 185 - 204

Liu YM, Dai TM, Lu HZ, Xu YZ, Wang CL and Kang WQ. 1997. ^{40}Ar-^{39}Ar and Sm-Nd isotopic dating of Qianlishan granites and related ores. Science in China (Series D), 27(5): 425 - 430(in Chinese)

Liu YM, Xu JF, Dai TM, Li XH, Deng XG and Wang Q. 2002. ^{40}Ar/^{39}Ar isotopic ages of Qitianling granite and their geologic implications. Science in China (Series D), (Suppl.): 41 - 48 (in Chinese)

Liu YS, Hu ZC, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao C and Chen H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-MC-ICP MS without applying an internal standard. Chemical Geology, 257(1 - 2): 34 - 43

Mao JW, Li HY and Pei RF. 1995. Nd-Sr isotopic and petrogenetic studies of the Qianlishan granits stock, Hunan Province. Mineral Deposits, 14(3): 235 - 242(in Chinese with English abstract)

Mao JW, Li XF, Bernd L, Chen W, Lan XM and Wei SL. 2004. ^{40}Ar-^{39}Ar dating of tin ores and related granite in Furong tin orefield, Hunan Province, and its geodynamic significance. Mineral Deposits, 23(2): 164 - 175 (in Chinese with English abstract)

Mao JW, Xie GQ, Guo CL and Chen YC. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2329 - 2338 (in Chinese with English abstract)

Mao JW, Xie GQ, Guo CL, Yuan SD, Chen YB and Chen YC. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. Geological Journal of China Universities, 14(4): 510 - 526(in Chinese with English abstract)

Mao JW, Pirajno F and Cook N. 2011. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings: An introduction to the special issue. Ore Geology Reviews, 43: 1 - 7

Mao JW, Chen MH, Yuan SD and Guo CL. 2011. South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits. Acta Geologica Sinica, 85(5): 636 - 658 (in Chinese with English abstract)

Morrison GW. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. Lithos, 13: 97 - 108

Qi CS, Deng XG, Li WX, Li XH, Yang YH and Xie LW. 2007. Origin of Darongshan-Shiwandashan S-type garnitoid belt from southeastern Guangxi: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotope constrains. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 403 - 412

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publications, 42: 313 - 345

Sun T, Zhou XM, Chen PR, Li HM, Zhou HY, Wang ZC and Shen WZ. 2003. Genesis of eastern Nanling Mesozoic strongly peraluminous granites and their tectonic significance. Science in China (Series D), 33(12): 1209 - 1218 (in Chinese)

Sylvester PJ. 1998. Post-collision strongly peraluminous granites. Lithos, 45: 29 - 44

Wang YJ, Fan WM, Xi XW, Guo F, Lin G and Zhang YH. 2002. Numerical modeling of the formation of Indo-Sinian peraluminous granitoids in Hunan Province: Basaltic underplating versus tectonic thickening. Science in China (Series D), 32(6): 491 - 499 (in Chinese)

Wang YJ, Fan WM, Liang XQ, Peng TP and Shi RY. 2005. SHRIMP

zircon U-Pb geochronology of Indosinian granites in Hunan Province and its petrogenetic implications. Chinese Science Bulletin, 50(13): 1395 – 1403

Wei DF, Bao ZY, Fu JM and Cai MH. 2007. Diagenetic and mineralization age of the Hehuaping tin-polymetallic ore-field, Hunan Province. Acta Geologica Sinica, 81(2): 244 – 252

Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185 – 220(in Chinese with English abstract)

Yuan SD, Peng JT, Shen NP, Hu RZ and Dai TM. 2007. ^{40}Ar-^{39}Ar isotopic dating of the Xianghualing Sn-polymetallic orefield in southern Hunan, China and its geological implications. Acta Geologica Sinica, 81(2): 278 – 286

Yuan SD, Peng JT, Hu RZ, Li HM, Shen NP and Zhang DL. 2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). Mineralium Deposita, 43: 375 – 382

Yuan SD, Peng JT, Hao S, Li HM, Geng JZ and Zhang DL. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constrains on the timing of tin-polymetallic mineralization. Ore Geology Reviews, 43(1): 235 – 242

Zhang RQ, Lu JJ, Zhu JC, Yao Y, Gao JF, Chen WF and Zhao ZJ. 2010. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of Hehuaping granite porphyry, southern Hunan Province, and its geological significance. Geological Journal of China Universities, 16(4): 436 – 447 (in Chinese with English abstract)

Zhao KD, Jiang SY, Jiang YH, and Liu DY. 2006. SHRIMP U-Pb dating of the Furong unit of Qitangling granite from Southeast Hunan Province and their geological implications. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2611 – 2616(in Chinese with English abstract)

Zhao ZH, Bao ZW and Zhang BY. 1998. Geochemistry of the Mesozoic basaltic rocks in southern Hunan Province. Science in China (Series D), 28(Suppl.): 7 – 14 (in Chinese)

Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. Tectonophysics, 326(3 – 4): 269 – 287

Zhou XM. 2003. My thinking about granite geneses of South China. Geological Journal of China Universities, 9(4): 556 – 565 (in Chinese with English abstract)

Zhou XM, Sun T, Shen WZ, Shu LS and Niu YL. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. Episodes, 29(1): 26 – 33

附中文参考文献

柏道远, 陈建成, 马铁球, 王先辉. 2006. 王仙岭岩体地质地球化学特征及其对湘东南印支晚期构造环境的制约. 地球化学,35(2): 113 – 125

蔡明海, 陈开旭, 屈文俊, 刘国庆, 付建明, 印建平. 2006. 湖南荷花坪锡多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 测年. 矿床地质, 25(3): 263 – 268

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

陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 陆建军, 范春芳. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类:岩石学制约和地球动力学背景. 中国科学(D 辑), 32(4): 279 – 289

陈毓川, 裴荣富, 张宏良等. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1 – 474

高山, 骆庭川, 张本仁, 张宏飞, 韩吟文, 赵志丹, Hartmut K. 1999. 中国东部地壳的结构和组成. 中国科学(D 辑), 29(3): 204 – 213

郭锋, 范蔚茗, 林舸, 林源贤. 1997. 湖南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨. 科学通报, 42(15):1661 – 1664

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. 地质通报, 21(6): 348 – 354

华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发. 矿床地质, 18(4): 300 – 307

华仁民, 陈培荣, 张文兰, 刘晓东, 陆建军, 林锦富, 姚军明, 戚文华, 张展适, 顾晟彦. 2003. 华南中、新生代与花岗岩有关的成矿系统. 中国科学(D 辑), 33(4): 335 – 343

侯可军. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595 – 2604

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. 矿床地质,28(4): 481 – 492

侯可军, 李延河, 谢桂青. 2010. LA-MC-ICPMS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 见 :李延河等编. 同位素分析和定年新方法. 北京:地质出版社,40 – 48

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其成因讨论. 高校地质学报, 14(4): 496 – 509

刘义茂, 戴橦谟, 卢焕章, 胥友志, 王昌烈, 康卫清. 1997. 千里山花岗岩成岩成矿的^{40}Ar-^{39}Ar 和 Sm-Nd 同位素年龄. 中国科学(D 辑), 27(5): 425 – 430

刘义茂, 许继峰, 戴橦谟, 李献华, 邓希光, 王强. 2002. 骑田岭花岗岩^{40}Ar-^{39}Ar 同位素年龄及其地质意义, 中国科学(D 辑),(增刊): 41 – 48

毛景文, 李红艳, 裴荣富. 1995. 湖南千里山花岗岩体的 Sr-Nd 同位素及岩石成因研究. 矿床地质,14(3): 235 – 242

毛景文, 李晓峰, Bernd L, 陈文, 蓝晓明, 魏绍六. 2004. 湖南芙蓉锡矿床锡矿石和有关花岗岩的^{40}Ar-^{39}Ar 年龄及其地球动力学意义. 矿床地质, 23(2): 164 – 175

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. 岩石学报, 23(10): 2329 – 2338

毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 陈彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510 – 526

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. 地质学报, 85(5): 636 – 658

祁昌实, 邓希光, 李武显, 李献华, 杨岳衡, 谢烈文. 2007. 桂东南大容山-十万大山 S 型花岗岩带的成因: 地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 23(2): 403 – 412

孙涛, 周新民,陈培荣,李惠民,周红英,王志成,沈渭洲. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义. 中国科学(D 辑), 33(12): 1209 – 1218

王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 彭头平, 石若玉. 2005. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示. 科学通报,50(12): 1259 – 1266

王岳军, 范蔚茗,席先武,郭锋,林舸, Zhang YH. 2002. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成-岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟. 中国科学(D 辑), 32(6): 491 – 499

吴福元,李献华,郑永飞,高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报,23(2): 185 – 220

章荣清, 陆建军, 朱金初, 姚远, 高剑锋, 陈卫锋, 招湛杰. 2010. 湖南荷花坪花岗斑岩锆石 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素制约及地质意义, 高校地质学报,16(4): 436 – 447

赵葵东, 蒋少涌, 姜耀辉, 刘敦一. 2006. 湘南骑田岭岩体芙蓉超单元的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 22(10): 2611 – 2616

赵振华, 包志伟, 张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征. 中国科学(D 辑),28(增刊):7 – 14

周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556 – 565